

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
FLUJO DE CARGA PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE  
TENSIÓN EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CON LA  
INCLUSIÓN DE UN MODELO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO  
SINCRÓNICO**

**AUTOR:  
EDWIN XAVIER FUENTES ALQUINGA**

**TUTOR:  
ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ**

**Quito, Junio del 2017**

Edwin Xavier Fuentes Alquina

**FLUJO DE CARGA PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CON LA INCLUSIÓN DE UN MODELO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO**

Universidad Politécnica Salesiana  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



**Edwin Xavier Fuentes Alquina** (Y'1983-M'11). Realizo sus estudios secundarios en el Colegio Nacional Mixto Santo Domingo de los Colorados obteniendo la especialización en Física-Matemáticas. Egresado de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana. Recibió el título de Psicólogo Clínico en la Universidad Politécnica Salesiana en 2011. Sus intereses de investigación incluyen las siguientes áreas: calidad energética, FACTS en sistemas eléctricos de potencia.

[efuentes@est.ups.edu.ec](mailto:efuentes@est.ups.edu.ec)

Dirigido por:



**Rogelio Alfredo Orizondo Martínez.** (Y'1972-M'1) Nació en Caracas, Venezuela. Recibió el Ing. Licenciado en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el M.S. en la Universidad Simón Bolívar. Actualmente es docente de la Universidad Politécnica Salesiana. Sus intereses de investigación incluyen FACTS, aplicaciones de control neurales y difusas, y electrónica de potencia.

[rorizondo@ups.edu.ec](mailto:rorizondo@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2017 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación: *“Flujo de carga para el mejoramiento de los perfiles de tensión en un sistemas eléctrico de potencia con la inclusión de un modelo del compensador estático sincrónico”* realizado por: Edwin Xavier Fuentes Alquina, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Junio 2017




Rogelio Alfredo Orizondo Martínez

Cédula de identidad: 175742419-5

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Edwin Xavier Fuentes Alquina, con documento de identificación N° 1717330896, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“Flujo de carga para el mejoramiento de los perfiles de tensión en un sistemas eléctrico de potencia con la inclusión de un modelo del compensador estático sincrónico”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
Nombre: Edwin Xavier Fuentes Alquina  
Cédula: 1717330896  
Fecha: Quito, Junio 2017

## ***INDICE GENERAL***

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>ESTRUCTURA Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL STATCOM .....</b>	<b>3</b>
2.1 Operación del STATCOM en el Sistema.....	3
<b>MODELACIÓN DEL FLUJO DE CARGA CON LA INCLUSIÓN DEL STATCOM .....</b>	<b>4</b>
3.1 Metodología propuesta para el flujo de carga con inclusión de un STATCOM....	4
3.2 Formulación matemática para flujos de potencia.....	6
3.3 Formulación matemática para flujos de potencia con la inclusión del STATCOM	7
3.4 Pseudocódigo para el flujo de potencia con la inclusión del STATCOM .....	8
<b>CASO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>9</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>14</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>14</b>
5.2 Estado del Arte.....	17
<b>ANEXOS .....</b>	<b>21</b>

## **1. INDICE DE FIGURAS**

1.	Estructura básica del STATCOM.....	3
2.	Modos de operación del STATCOM. a) Modo Capacitivo; b) Modo Inductivo; c) Modo Flotante. ....	4
3.	Circuito equivalente del STATCOM conectado a la barra de carga. ....	4
4.	Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando en el sistema se ha incrementado el 70% de la carga.....	11
5.	Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando en el sistema se ha reducido el 70% de la carga. ....	11
6.	Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando el sistema se ha aumentado en 30MVAR a la carga. ....	13
7.	Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando el sistema se ha disminuido en 30MVAR a la carga. ....	13

## **2. INDICE DE TABLAS**

1.	Pseudocódigo para flujos de potencia con la inclusión del STATCOM.....	8
2.	Características eléctricas del modelo IEEE 9 barras.....	9
3.	Datos de líneas y transformadores del modelo IEEE 9 barras. ....	9
4.	Modelo IEEE 9 barras. Sistema estándar.....	9
5.	Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM. Sistema modificado, incrementado en un 70 % las cargas. Voltajes y ángulos. ....	10
6.	Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM. Sistema modificado, reducido en un 70 % las cargas. Voltajes y ángulos.....	10
7.	Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM. Sistema modificado, incrementado en 30 MVAR las cargas. Voltajes y ángulos. ....	10
8.	Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM. Sistema modificado, reducido en 30 MVAR las cargas. Voltajes y ángulos.....	10
9.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado, incrementado en 70 % la carga. Voltajes y ángulos. ....	10
10.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado, reducido en 70 % la carga. Voltajes y ángulos.....	11
11.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado, incrementado en 70 % la carga. Potencias activas y reactivas. ....	11
12.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado, reducido en 70 % la carga. Potencias activas y reactivas. ....	11
13.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado aumentado en 30 MVAR las cargas. Voltajes y ángulos. ....	12
14.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado disminuido en 30 MVAR las cargas. Voltajes y ángulos. ....	12
15.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado aumentado en 30 MVAR a las cargas. Potencias activas y reactivas. ....	12
16.	Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado disminuido en 30 MVAR a las cargas. Potencias activas y reactivas. ....	12

# FLUJO DE CARGA PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSION EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CON LA INCLUSIÓN DE UN MODELO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO

## Resumen

En este documento se presenta la mejora en el perfil de tensión en un sistema eléctrico de potencia (SEP), a través de la inclusión de un compensador estático sincrónico (STATCOM). Más de 20 años de investigación este equipo ha demostrado ser una solución debido a su capacidad de compensar la potencia reactiva en respuesta a las variaciones de voltaje consiguiendo mantener la tensión especificada en su punto de conexión con la red y dentro del margen operativo factible. Para efectos del estudio se investiga sobre la estructura, los principios operativos y los modelos matemáticos que rigen la transmisión de potencia al incluir un STATCOM. También se estudia el régimen permanente mediante el flujo de carga basado en el método de Newton-Raphson y el flujo de carga modificado con la inclusión de un STATCOM en un caso estándar IEEE de 9 barras, sistema que se modifica para obtener nodos críticos en donde será colocado el controlador para compensar potencia reactiva, sin considerar ni la ubicación ni el dimensionamiento óptimos del compensador que beneficiaría aún más la compensación reactiva. Las simulaciones de flujo de potencia muestran los perfiles de voltaje mejorados para condiciones de carga específicas.

## Abstract

This work present voltage profile improvements to the electrical power system for a 9 busbar IEEE standard case, through the inclusion of a synchronous static compensator (STATCOM), a well-known power electronic based equipment. More than 20 years of investigations have demonstrate its performance to compensate reactive power in response to voltage variations at transmission levels. For the sake of analysis, its structure, operational principles and mathematical models are briefly presented. Its steady state is also studied using a modified Newton-Raphson based power flow algorithm. Simulations are conducted to evaluate the equipment by its insertion in the 9 busbar IEEE standard case. There is no attempt to optimize neither the STATCOM sizing nor its location within the electrical power system. Power flow simulations show the improved voltage profiles for specific load conditions.

**Keywords:** Power system management, Reactive power, Static VAr compensators, Voltage control.

**Palabras Clave:** Gestión del sistema de energía, Potencia reactiva, Compensadores estáticos VAr, Control de tensión.

## 1. Introducción

El sistema para transportar la energía debe tornarse de mayor eficiencia para adecuarse en un sistema eléctrico competitivo mediante un control rápido y fiable de los parámetros y variables relacionados con la transmisión en potencia, con el fin de utilizar la capacidad en las redes de transmisión existentes de manera más eficaz [1] [2]. La demanda de una respuesta más rápida al cambio de parámetros del sistema y mayor estabilidad del sistema han estimulado el surgimiento y desarrollo de nuevas tecnologías denominadas como Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexible (FACTS) [3]. El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) los ha definido como sistemas que incorporan la electrónica de potencia para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia [4]. De este modo, los parámetros y variables relacionados con la transmisión en potencia como: impedancia en serie, impedancia de derivación, corriente y tensión en el sistema pueden ser modificados mediante tecnologías FACTS [5], [6] para lograr el control de voltaje, control de flujo de energía reactiva/activa, estabilización transitoria y en estado estacionario una mejor funcionalidad de la transmisión de energía existente [7].

Para lograr el control de la potencia reactiva, de forma convencional, puede corregirse mediante condensadores, máquinas de modulación de fase y los generadores síncronos; pero debido a la impedancia fija del condensador paralelo, no puede efectuar un seguimiento de los cambios dinámicos de la potencia reactiva de la carga. En cambio, los sistemas de compensación ajustable, tales como: compensadores síncronos y generadores síncrono son equipos rotativos, no sólo que generan

ruido, sino que también presentan grandes pérdidas de energía [8] [9]. Ante los desconciertos mencionados la electrónica de potencia mediante el uso de los semiconductores de potencia han dado lugar a importantes progresos en la realización de sistemas de energía más eficientes. La principal razón es su capacidad para hacer frente a la dinámica del sistema de potencia y controlar el flujo de energía [10]. Se puede incrementar la cantidad de potencia en régimen permanente y se pueden mejorar los perfiles de tensión a través de una compensación en derivación de reactivos [11]. El principio de operación de los controladores en derivación (Shunt Connected Controllers) consiste en inyectar corriente al sistema eléctrico de potencia (SEP) en el punto de conexión. Si la corriente inyectada está en cuadratura con la tensión de línea, entonces se afirma que el controlador absorbe o consume potencia reactiva [12]. Existen varias categorías de controladores en derivación definidos por el IEEE entre los que destacan: el Compensador Estático Síncrono (STATCOM), el Compensador Estático de Reactivos (SVC), el Sistema Estático de Reactivos (SVS), el reactor controlado por Tiristores (TCR), el capacitor controlado por Tiristores (TSC) y el reactor conmutado por Tiristores (TSR), entre otros [13]. El STATCOM es un generador síncrono estático operado como un compensador estático de reactivos conectado en derivación cuya corriente de salida capacitiva o inductiva puede ser controlada independientemente del voltaje del sistema [12], [14]. El STATCOM puede controlar la inyección de potencia reactiva en un nodo del sistema eléctrico de potencia mejorando el perfil de tensión, la confiabilidad y la estabilidad del sistema de potencia, lo que hará con



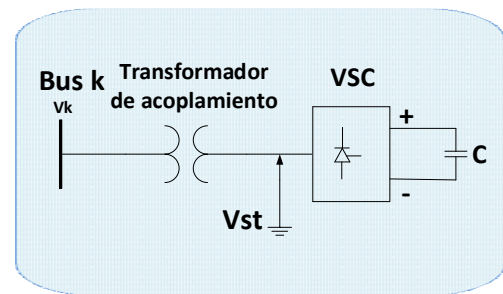
grandes beneficios, [15],[16]. Su salida se ajusta para inyectar o absorber la corriente reactiva y que son relativamente más rápidos, pero necesita un gran almacenamiento de energía y grandes inversores [17]. El STATCOM puede ser una buena solución para resolver el problema de la compensación reactiva, la demanda de componentes armónicos de las cargas no lineales y la corrección del factor de potencia en las corrientes de carga [18]. En este estudio se compara el perfil de tensión en el punto de conexión de la red y su impacto sobre el SEP incluyendo un modelo del STATCOM; y de esta forma realizar comparaciones en las variables de estado con el sistema no compensado. Para efectos de este estudio se presenta un flujo de potencia según la metodología de Fuerte Esquivel y E Acha, adaptado al caso normalizado IEEE 9 barras, basado en el método de Newton-Raphson y que implica la modificación de la matriz jacobiana.

El trabajo está organizado de la siguiente forma: La sección 2 describe la estructura y principio de operación del STATCOM; la sección 3 presenta algunos modelos matemáticos del STATCOM en el SEP e incluye la descripción del método de flujo de carga propuesto por Esquivel y Acha; en la sección 4 se muestran los resultados de los flujos de carga sin el equipo y con la inserción del STATCOM en el sistema IEEE de 9 barras bajo diferentes condiciones de carga y se analizan algunos de los resultados obtenidos. En la sección 5 se exponen las conclusiones del estudio y se ofrecen recomendaciones adicionales para futuros trabajos.

## 2. Estructura y Principio de Operación del STATCOM

El STATCOM está constituido por un convertidor de fuente de voltaje (VSC),

un condensador de CC o un dispositivo de almacenamiento de energía y un transformador de conexión [19], [20]. El STATCOM se conecta en derivación a la red eléctrica a través de un transformador de acoplamiento [21]. La estructura básica del STATCOM se ilustra en la figura 1.



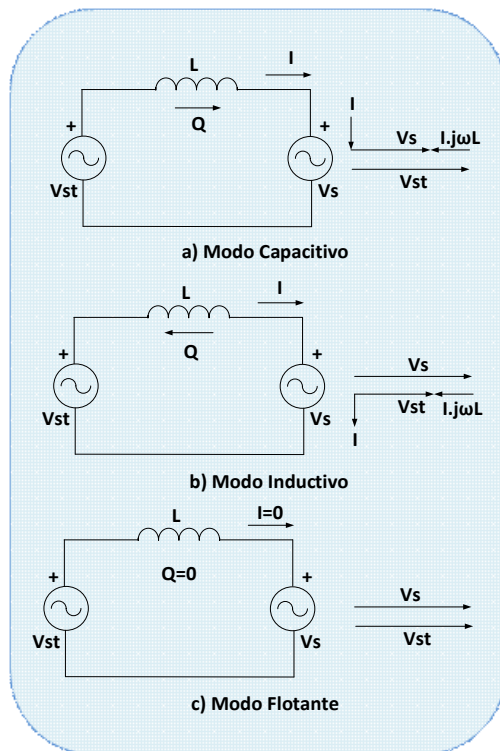
**Figura 1.** Estructura básica del STATCOM.

El VSC convierte el voltaje de CC en un conjunto de tensiones de AC trifásicas, obtenidas mediante modulación por ancho de pulso [22]. Esta técnica permite la generación o absorción de potencia reactiva mediante el control de fase y amplitud de las formas de onda de voltaje a la salida del VSC. El convertidor mantiene el condensador cargado al nivel de voltaje requerido; haciendo que su voltaje de salida retrase el voltaje del sistema AC por un pequeño ángulo de fase [21]. El condensador de CC tiene como función dar soporte y estabilizar el voltaje de CC, para permitir el funcionamiento del convertidor.

### 2.1 Operación del STATCOM en el Sistema

El flujo de potencia reactiva puede controlarse ajustando la magnitud del voltaje de salida del STATCOM respecto al voltaje de la barra en el SEP. Si el voltaje del STATCOM [ $V_{st}$ ] es mayor al voltaje del sistema [ $V_s$ ], el STATCOM inyecta corriente hacia el SEP; en este caso, el equipo opera en modo capacitivo, es decir, inyectando potencia reactiva al SEP. Si el voltaje

del STATCOM [ $V_{st}$ ] es menor al voltaje del sistema [ $V_s$ ], el STATCOM consume la corriente; en este caso, el compensador opera en modo inductivo, es decir, absorbiendo potencia reactiva del SEP. Si el voltaje del STATCOM [ $V_{st}$ ] es igual al voltaje del sistema [ $V_s$ ] entonces no habrá intercambio de reactivos, por lo que el flujo de potencia reactiva es cero, y se dice, que el STATCOM opera en modo flotante [23] [24]. Los modos de operación se ilustran en la figura 2.



**Figura 2.** Modos de operación del STATCOM.  
a) Modo Capacitivo; b) Modo Inductivo; c) Modo Flotante.

De haber intercambio de potencia activa con el SEP, se lo realiza variando el ángulo del voltaje del compensador con referencia al ángulo del voltaje en el nodo del SEP al cual se acopla [8]. En condiciones ideales, el equipo no absorbe potencia activa, sin embargo, el STATCOM no puede controlar la inyección / absorción de energía activa [10], pero, controla la potencia reactiva buscando mantener en lo posible el voltaje constante en 1 p.u.; lo que asegura una aproximación a un factor

de potencia nulo en el punto de acoplamiento del STATCOM [25].

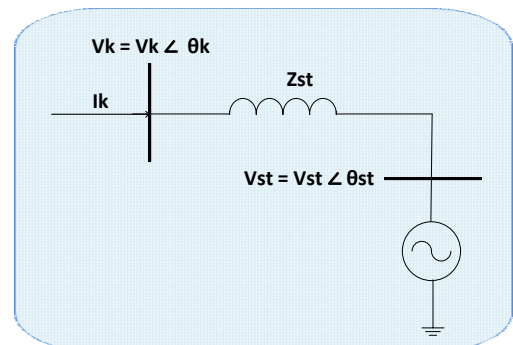
### 3. Modelación del Flujo de Carga con la Inclusión del STATCOM

Existen varios métodos para la resolución de flujo de potencia con la inclusión de un STATCOM en el SEP. Algunos métodos revisados en la bibliografía consultada son los siguientes: el método Newton-Raphson (NR) modificado mediante subbloques de la matriz del jacobiano de S. Bhowmick et al. [26]; el método NR modificado mediante inyección de corriente y de potencia propuesto por S. Kamel & F. Jurado [27]; el método de Inyección de Potencia y Programación Lineal (PIM), que no altera la matriz jacobiana, propuesto por Ying Xiao, T. H. Song y Y. Z. Sun; y el método NR modificado mediante ecuaciones de flujo de potencia propuesto por Acha et al. [28]. Este último método es el que se emplea en el presente estudio.

#### 3.1 Metodología propuesta para el flujo de carga con inclusión de un STATCOM

La ecuación de la fuente ideal de voltaje del STATCOM, dado por (1) [27], [28].

$$V_{st} = |V_{st}|(\cos\theta_{st} + j\sin\theta_{st}) \quad (1)$$



**Figura 3.** Circuito equivalente del STATCOM conectado a la barra de carga.

Donde:  $V_{st}$  es el voltaje del controlador;  $\theta_{st}$  es el ángulo del controlador en p.u. De la figura 3, a partir de las barras del STATCOM y del barra k se obtienen las ecuaciones de potencia activa y reactiva para el STATCOM, viene dado por (2) al (5) [27], [28], [29].

$$P_{st} = V_{st}^2 \cdot G_{st} - V_{st} \cdot V_k (G_{st} \cdot \cos(\theta_{st} - \theta_k) + B_{st} \cdot \sin(\theta_{st} - \theta_k)) \quad (2)$$

$$Q_{st} = -V_{st}^2 \cdot B_{st} + V_{st} \cdot V_k (G_{st} \cdot \sin(\theta_{st} - \theta_k) - B_{st} \cdot \cos(\theta_{st} - \theta_k)) \quad (3)$$

$$P_k = V_k^2 \cdot G_{st} - V_k \cdot V_{st} (G_{st} \cdot \cos(\theta_k - \theta_{st}) + B_{st} \cdot \sin(\theta_k - \theta_{st})) \quad (4)$$

$$Q_k = -V_k^2 \cdot B_{st} + V_k \cdot V_{st} (G_{st} \cdot \sin(\theta_k - \theta_{st}) - B_{st} \cdot \cos(\theta_k - \theta_{st})) \quad (5)$$

Donde:  $P_{st}$  es la potencia activa calculada del STATCOM;  $Q_{st}$  es la potencia reactiva calculada del STATCOM;  $P_k$  es la potencia activa calculada de la barra a la cual se conecta el STATCOM;  $Q_k$  es la potencia reactiva calculada de la barra a la cual se conecta el STATCOM;  $G_{st}$  es la conductancia del STATCOM;  $B_{st}$  es la susceptancia del STATCOM;  $V_k$  es el voltaje de la barra a la cual se conecta el STATCOM; y  $\theta_k$  es el ángulo de la barra a la cual se conecta el STATCOM. Las ecuaciones (2) a (5) están en por unidad (p.u.).

Las estimaciones lineales de errores de la potencia activa y reactiva, para el bus y el controlador, se deducen de linealizar las ecuaciones de (2) al (7) [18]. El jacobiano viene expresado mediante las submatriz compuesta de derivadas parciales, viene dado por (6) [28], [30].

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{st} \\ \Delta Q_{st} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_{st}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{st}} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_{st}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{st}} \\ \frac{\partial P_{st}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{st}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{st}}{\partial \theta_{st}} & \frac{\partial P_{st}}{\partial V_{st}} \\ \frac{\partial Q_{st}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{st}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_{st}}{\partial \theta_{st}} & \frac{\partial Q_{st}}{\partial V_{st}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \Delta \theta_{st} \\ \Delta V_{st} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde:  $\Delta P_k$  es el estimador de error para la potencia activa de la barra;  $\Delta Q_k$  es el

estimador de error para la potencia reactiva de la barra;  $\Delta P_{st}$  es el estimador de error para la potencia activa del STATCOM;  $\Delta Q_{st}$  es el estimador de error para la potencia reactiva del STATCOM;  $\Delta V_k$  es el estimador de error para el voltaje de la barra;  $\Delta \theta_k$  es el estimador de error para el ángulo de la barra;  $\Delta V_{st}$  es el estimador de error para el voltaje del STATCOM;  $\Delta \theta_{st}$  es el estimador de error para el ángulo del STATCOM.

Para la transferencia de potencia activa y reactiva desde el bus k al STATCOM, se tiene (7) y (8) [26].

$$P_k = \frac{V_k V_{st}}{X_{st}} \sin(\theta_k - \theta_{st}) \quad (7)$$

$$Q_k = - \left( \frac{V_k V_{st}}{X_{st}} \cos(\theta_k - \theta_{st}) - \frac{V_k^2}{X_{st}} \right) \quad (8)$$

Donde:  $P_k$  es la transferencia de potencia activa desde la barra k al STATCOM;  $Q_k$  es la transferencia de potencia reactiva desde la barra k al STATCOM; y  $X_{st}$  es la reactancia de conexión, dicha reactancia es relativamente pequeña, en general de 0,1 a 0,15 p.u. que en la práctica es proporcionada por la inductancia de fugas por fases del transformador de acoplamiento. Todas las variables están en p.u. [12], [27].

Para la transferencia de potencia activa y reactiva desde el controlador al bus k, se tiene (9) y (10) [26].

$$P_{st} = \frac{V_{st} V_k}{X_{st}} \sin(\theta_{st} - \theta_k) \quad (9)$$

$$Q_{st} = - \left( \frac{V_{st} V_k}{X_{st}} \cos(\theta_{st} - \theta_k) - \frac{V_{st}^2}{X_{st}} \right) \quad (10)$$

Donde:  $P_{st}$  es la transferencia de potencia activa desde el STATCOM a la barra k;  $Q_{st}$  es la transferencia de

potencia reactiva desde el STATCOM a la barra k.

### 3.2 Formulación matemática para flujos de potencia

La forma polar y rectangular de las ecuaciones de flujo de carga viene dadas por (11) y (12).

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^{j=n} |V_i| \cdot |V_j| \cdot (e^{j\theta_{ij}}) \cdot (g_{ij} - jb_{ij}) \quad (11)$$

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^{j=n} |V_i| \cdot |V_j| \cdot (\cos\theta_{ij} + jsen\theta_{ij}) (g_{ij} - jb_{ij}) \quad (12)$$

Donde:  $\bar{S}_i$  es la potencia compleja que se inyecta en el nodo i respecto a los demás nodos;  $n$  es la cantidad total de nodos del sistema;  $V_i$  es el voltaje en el nodo i;  $V_j$  es el voltaje en el nodo j,  $\theta_{ij}$  es la diferencia angular entre el  $\theta_i$  y el  $\theta_j$ ;  $g_{ij}$  es ij-ésimo elemento de la matriz propia de conductancia nodal;  $b_{ij}$  es ij-ésimo elemento de la matriz propia de suceptancia nodal.

Descomponiendo la forma rectangular de las ecuaciones de flujo de carga, se obtiene: la potencia activa y reactiva calculada, expresadas por (13) y (14).

$$P_i^{cal} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot (g_{ij} \cos\theta_{ij} + b_{ij} \sin\theta_{ij}) \quad (13)$$

$$Q_i^{cal} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot (g_{ij} \sin\theta_{ij} - b_{ij} \cos\theta_{ij}) \quad (14)$$

Donde:  $P_i^{cal}$  es la potencia activa calculada que se inyecta en el nodo i respecto a los demás nodos;  $Q_i^{cal}$  es la potencia reactiva calculada que se inyecta en el nodo i respecto a los demás nodos.

Se calcula la matriz  $Y_{bus}$  que contiene todas las admitancias  $Y_{i,j}$  del SEP, la cual es de dimensión  $N \times N$ , donde  $N$  es el número de barras.

Los tipos de barras, en un problema de flujo de carga son: las barras de generación o PV, las barras de carga o PQ y la barra slack.

En las barras de generación se conoce la potencia activa y el voltaje; y sus incógnitas son: la potencia reactiva y el ángulo. La ecuación de potencia especificada es dada por la diferencia entre potencia generado y consumida, expresada por (15); y el voltaje es igual al voltaje especificado, dado por la ecuación (16).

$$P_i^{esp} = P_{Gi}^{esp} - P_{Ci}^{esp} \quad (15)$$

$$V_i = V_i^{esp} \quad (16)$$

Donde:  $P_i^{esp}$  es la potencia activa especifica en el nodo i;  $P_{Gi}^{esp}$  es la potencia activa generada especificada en el nodo i;  $P_{Ci}^{esp}$  es la potencia activa consumida especificada en el nodo i;  $V_i^{esp}$  es el voltaje especificado en el nodo i.

Las ecuaciones de balance en barras de generación PV, viene dado por (17) y (18).

$$P_i^{esp} = P_i^{cal} \quad (17)$$

$$V_i = V_i^{sp} \quad (18)$$

En las barras de carga se conoce la potencia activa y la potencia reactiva; y sus incógnitas son: el voltaje y el ángulo. Las ecuaciones de potencia activa y reactiva especificado, viene dado por (19) y (20).

$$P_i^{esp} = -P_{Ci}^{esp} \quad (19)$$

$$Q_i^{esp} = -Q_{Ci}^{esp} \quad (20)$$

Donde:  $Q_i^{esp}$  es la potencia reactiva especificada en el nodo i;  $Q_{Ci}^{esp}$  es la potencia reactiva consumida especificada en el nodo i.

Las ecuaciones de balance en barras de carga PQ, viene dado por (21) y (22).

$$P_i^{esp} = P_i^{cal} \quad (21)$$

$$Q_i^{esp} = Q_i^{cal} \quad (22)$$

En la barra slack se conoce la magnitud de la tensión y su ángulo; mientras que las incógnitas son: la potencia activa y la potencia reactiva.

En régimen permanente, uno de sus métodos para realizar flujos de carga es mediante la aplicación del método iterativo de Newton-Raphson (NR) que permite resolver ecuaciones algebraicas no lineales.

El método NR necesita anular la diferencia entre los valores de la potencia especificada y de la potencia calculada, viene dado por (23) y (24).

$$\Delta P_i^r = P_i^{esp} - P_i^{cal^r} \quad (23)$$

$$\Delta Q_i^r = Q_i^{esp} - Q_i^{cal^r} \quad (24)$$

Donde:  $r$  es el número de iteraciones a resolver el sistema lineal de ecuaciones. Al conjunto entre las ecuaciones de  $\Delta P_i^r$  y  $\Delta Q_i^r$  se lo denomina como vector de apartamiento, dado por (25).

$$F = \begin{bmatrix} P_1^{esp} - P_1^{cal} \\ Q_1^{esp} - Q_1^{cal} \\ \vdots \\ P_n^{esp} - P_n^{cal} \\ Q_n^{esp} - Q_n^{cal} \end{bmatrix}^r \quad (25)$$

Los cambios en los voltajes y ángulos, debido a los cambios de potencia activa y reactiva, son obtenidos por la inversión de la matriz del Jacobiano, mediante las ecuaciones (26) y (27).

$$\Delta \theta_i^r = (J^r)^{-1} \cdot -\Delta P_i^r \quad (26)$$

$$\Delta V_i^r = (J^r)^{-1} \cdot -\Delta Q_i^r \quad (27)$$

La construcción de la matriz del jacobiano viene dado por las derivadas parciales de las relaciones de flujo de carga, a través de (28).

Donde:  $J$  es la matriz del jacobiano. La matriz del jacobiano para  $n$  cantidad de barras, está dada por (29).

$$J^r = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} V_j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} V_j \end{bmatrix}^r \quad (28)$$

$$J^r = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{cal}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1^{cal}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_1^{cal}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1^{cal}}{\partial V_n} V_n \\ \frac{\partial Q_1^{cal}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1^{cal}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_1^{cal}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1^{cal}}{\partial V_n} V_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{cal}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_n^{cal}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_n^{cal}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{cal}}{\partial V_n} V_n \\ \frac{\partial Q_n^{cal}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_n^{cal}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_n^{cal}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n^{cal}}{\partial V_n} V_n \end{bmatrix}^r \quad (29)$$

Los nuevos valores para ángulos y voltajes en las barras están dadas por las ecuaciones (30) y (31).

$$\theta_i^{r+1} = \theta_i^r + \Delta \theta_i^r \quad (30)$$

$$V_i^{r+1} = V_i^r + \Delta V_i^r V_i^r \quad (31)$$

Donde:  $\theta_i^{r+1}$  es el nuevo valor estimado del ángulo;  $V_i^{r+1}$  es el nuevo valor estimado del voltaje.

Se itera el proceso hasta que cumplan el criterio de convergencia  $\varepsilon$ , es decir, se comprueba que  $\Delta P_i$  y  $\Delta Q_i \leq \varepsilon$ .

### 3.3 Formulación matemática para flujos de potencia con la inclusión del STATCOM

La última matriz jacobiana, que haya cumplido con el criterio de convergencia se le denomina como  $J_{old}$ . Para la construcción del nuevo jacobiano  $J_{new}$  se procede de la siguiente manera:

En la columna(s) de la derivada respecto al ángulo de la barra donde se conecta el STATCOM del  $J_{old}$  se añade: la derivada parcial de  $P_k$  con respecto a  $\theta_k$  para la potencia activa; y se añade la derivada parcial de  $Q_k$  con respecto a  $\theta_k$  para la potencia reactiva. En la columna(s) de la derivada respecto al voltaje de la barra donde se conecta el STATCOM del  $J_{old}$  se hace cero, a excepción donde se conecta el STATCOM, que toman los valores al

calcular las derivadas parciales de  $\frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k$  y  $\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k$ .

Luego, la matriz de  $J_{new}$  es redimensionada con respecto a la dimensión de la matriz de  $J_{old}$ , viene dado por (31).

$$(n_{new} \times n_{new}) = ((n_{old} + 2k) \times (n_{old} + 2k)) \quad (31)$$

Donde:  $n_{new} \times n_{new}$  es la dimensión de la nueva matriz de  $J_{new}$ ;  $n_{old} \times n_{old}$  es la dimensión de la antigua matriz de  $J_{old}$ ;  $k$  es la barra donde el STATCOM va a conectarse.

Se complementa la matriz  $J_{new}$  con el resto de derivadas parciales de la ecuación (6).

El voltaje y ángulo en la barra donde se conecta el STATCOM son conocidos y se corresponden con el voltaje deseado. El voltaje y ángulo en el STATCOM está dado por los valores de inicialización. La potencia activa y reactiva del STATCOM se calcula mediante las ecuaciones (2) y (3), las cuales son sumadas en  $\Delta P$  y  $\Delta Q$  respectivamente, según sea la barra  $k$  donde se encuentra conectado el equipo STATCOM.

Se emplea el método Newton-Raphson, pero ahora, con la inclusión del controlador hasta que cumpla el criterio de convergencia.

Para la aplicación del método NR se recalculan las potencias activa y reactiva calculadas en la barra  $k$ , mediante la ecuaciones (4) y (5).

Se necesita anular la diferencia entre los valores de la potencia especificada y de la potencia calculada mediante las siguientes ecuaciones (33) y (34) [29].

$$\Delta P_i^{rn} = P_i^{esp} - P_i^{cal^{rn}} \quad (33)$$

$$\Delta Q_i^{rn} = Q_i^{esp} - Q_i^{cal^{rn}} \quad (34)$$

Para facilidad de cálculo, se encuentra el vector de apartamiento a través de la diferencia de la potencia activa entre la potencia activa específica y calculada;

así como, de la diferencia de la potencia reactiva entre la potencia reactiva específica y calculada; y teniendo en consideración la adición de la potencia activa y reactiva calculada en la barra  $k$ . El vector de apartamiento viene dado por (35).

$$FS = \begin{bmatrix} P_1^{esp} - P_1^{cal} \\ Q_1^{esp} - Q_1^{cal} \\ \vdots \\ P_k^{esp} - P_k^{cal} + P_k^{cal_{new}} \\ Q_k^{esp} - Q_k^{cal} + Q_k^{cal_{new}} \\ \vdots \\ P_n^{esp} - P_n^{cal} \\ Q_n^{esp} - Q_n^{cal} \end{bmatrix}^r \quad (35)$$

Las nuevas estimaciones del error en ángulo y voltaje, están dadas por (36) y (37).

$$\Delta \theta_i^{rn} = (J_{new}^{rn})^{-1} \cdot -\Delta P_i^{rn} \quad (36)$$

$$\Delta V_i^{rn} = (J_{new}^{rn})^{-1} \cdot -\Delta Q_i^{rn} \quad (37)$$

Los nuevos ángulos y voltajes en las barras, están dadas por (38) y (39) [30]. Los nuevos ángulos y voltajes en el controlador están dadas por la ecuaciones (38) y (39) considerando que  $-\Delta V_i^{rn}$  es con respecto a la barra donde se conecta el controlador.

$$\theta_i^{rn+1} = \theta_i^{rn} - \Delta \theta_i^{rn} \quad (38)$$

$$V_i^{rn+1} = V_i^{rn} - \Delta V_i^{rn} V_i^{rn} \quad (39)$$

Para el cálculo de la transferencia de potencia activa y reactiva, tanto en la barra  $k$  como en la barra del controlador, se utilizan las ecuaciones del (7) al (10).

### 3.4 Pseudocódigo para el flujo de potencia con la inclusión del STATCOM

Tabla 1: Pseudocódigo para flujos de potencia con la inclusión del STATCOM

Pseudocódigo
<i>Inicio</i>
<b>Paso 1:</b> Ingreso de los parámetros de la red e información nodal.
<b>Paso 2:</b> Ingreso de valores de inicialización.

**Paso 3:** Creación de la matriz Ybus.

**Paso 4:** Calcular  $P_i^{cal}$  y  $Q_i^{cal}$  con las ecuaciones (13) y (14).

**Paso 5:** Para  $r = 0$  hasta  $itmax$  hacer:

**Paso 6:** Calcular la matriz Jacobiana con la ecuación (28).

**Paso 7:** Calcular  $\Delta P_i$  y  $\Delta Q_i$  con las ecuaciones (23) y (24).

**Paso 8:** Calcular  $\Delta V_i$  y  $\Delta \theta_i$  con las ecuaciones (26) y (27).

**Paso 9:** Actualizar las variables  $V_i$  y  $\theta_i$  con las ecuaciones (30) y (31).

**Paso 10:** Incrementar  $r = r + 1$  hasta comprobar que  $\Delta P_i$  y  $\Delta Q_i \leq \varepsilon$ , caso contrario ir al Paso 4.

**Paso 11:** Ingreso de los parámetros del bus al que se conecta el STATCOM:

$V_k, \theta_k$

**Paso 12:** Ingreso de los parámetros y valores de inicialización del STATCOM:

$X_{st}, V_{st}, \theta_{st}, G_{st}, B_{st}$ .

**Paso 13:** Para  $rn = 0$  hasta  $itnmax$  hacer:

**Paso 14:** Calcular:  $P_{st}$  y  $Q_{st}$ , con las ecuaciones (2), (3), respectivamente.

**Paso 15:** Calcular:  $P_k$  y  $Q_k$  con las ecuaciones (4) y (5), respectivamente.

**Paso 16:** Calcular la nueva matriz jacobiana  $J_{new}$  con la ecuación (31) y de la submatriz compuesta de derivadas parciales con la ecuación (6).

**Paso 17:** Calcular  $\Delta P_i$  y  $\Delta Q_i$  con las ecuaciones (33) y (34).

**Paso 18:** Calcular  $\Delta V_i$  y  $\Delta \theta_i$  con las ecuaciones (36) y (37).

**Paso 19:** Actualizar las variables  $V_i$  y  $\theta_i$  con las ecuaciones (38) y (39).

**Paso 20:** Incrementar  $rn = rn + 1$  hasta comprobar que  $\Delta P_i$  y  $\Delta Q_i \leq \varepsilon_n$ , caso contrario, ir al Paso 15.

**Paso 21:** Calcular la transferencia de potencia activa y reactiva, tanto en el bus k como en el bus de controlador, utilizando las ecuaciones del (7) al (10).

**Fin**

Tabla 2: Características eléctricas del modelo IEEE 9 barras.

Bus	Pg [MW]	Qg [MVar]	Pc [MW]	Qc [MVar]	V [pu]	$\theta$
1	-	-	0	0	1.040	0
2	163	-	0	0	1.025	-
3	85	-	0	0	1.025	-
4	0	0	0	0	-	-
5	0	0	125	50	-	-
6	0	0	90	30	-	-
7	0	0	0	0	-	-
8	0	0	100	35	-	-
9	0	0	0	0	-	-

Tabla 3: Datos de líneas y transformadores del modelo IEEE 9 barras.

Tramo	Elemento	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1-4	T1	0,0000	0,0576	0,0000
2-7	T2	0,0000	0,0625	0,0000
3-9	T3	0,0000	0,0586	0,0000
7-8	Línea	0,0085	0,0720	0,0745
8-9	Línea	0,0119	0,1008	0,1045
7-5	Línea	0,0320	0,1610	0,1530
9-6	Línea	0,0390	0,1700	0,1790
5-4	Línea	0,0100	0,0850	0,0880
4-6	Línea	0,0170	0,0920	0,0790

Tabla 4: Modelo IEEE 9 barras. Sistema estándar.

	Voltajes [p.u.]		Ángulos [rad]
V1	1,0400	01	0,0000
V2	1,0250	02	9,2800
V3	1,0250	03	4,6648
V4	1,0258	04	-2,2168
V5	0,9956	05	-3,9888
V6	1,0127	06	-3,6874
V7	1,0258	07	3,7197
V8	1,0159	08	0,7275
V9	1,0324	09	1,9667

Para efectos del estudio se ha modificado el sistema estándar de 9 barras IEEE. Las modificaciones realizadas han sido a la carga: En el primer escenario se ha incrementado en un 70 % el valor de las cargas originales (los valores de las cargas originales son para la carga A de 50 MVar; para la carga B de 30 MVar; y la carga C de 35 MVar, ubicadas en las barras 5, 6 y 8, respectivamente); en un segundo escenario, reduciendo en un 70 % el valor de las cargas originales. Los valores de voltajes y ángulos al ejecutar el flujo de carga, aumentando y disminuyendo el 70% de la carga y sin considerar la inclusión del modelo del STATCOM, se aprecian en las tablas 5 y 6.

## 4. Caso de Estudio y Análisis de Resultados

Para el caso de estudio se considera el caso estándar del sistema de 9 barras de IEEE, que incluye 3 generadores y 3 cargas, y cuyos datos se muestran en las tablas 2 y 3. Se considera una potencia base de 100 MVA y un voltaje base en las líneas de 230 kV.

Para el flujo de carga del sistema estándar se obtiene los siguientes voltajes y ángulos, mostrados en la tabla 4.

Tabla 5: Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM.  
Sistema modificado, incrementado en un 70 % las  
cargas. Voltajes y ángulos.

Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,3316	1,0250 $\angle$ 9,2726	1,0250 $\angle$ 9,4424
3	1,0250 $\angle$ 4,6004	1,0250 $\angle$ 4,6725	1,0250 $\angle$ 4,7482
4	1,0134 $\angle$ -2,2572	1,0188 $\angle$ -2,2363	1,0234 $\angle$ -2,2269
5	0,9627 $\angle$ -4,0017	0,9900 $\angle$ -4,0381	0,9911 $\angle$ -3,9996
6	1,0129 $\angle$ -3,7793	0,9931 $\angle$ -3,6244	1,0087 $\angle$ -3,6968
7	1,0176 $\angle$ 3,7265	1,0235 $\angle$ 3,7001	1,0181 $\angle$ 3,8398
8	1,0094 $\angle$ 0,6704	1,0126 $\angle$ 0,7014	0,9980 $\angle$ 0,8387
9	1,0286 $\angle$ 1,8925	1,0279 $\angle$ 1,9627	1,0262 $\angle$ 2,0340

Tabla 6: Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM.  
Sistema modificado, reducido en un 70 % las  
cargas. Voltajes y ángulos.

Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,2182	1,0250 $\angle$ 9,2811	1,0250 $\angle$ 9,1194
3	1,0250 $\angle$ 4,7116	1,0250 $\angle$ 4,6501	1,0250 $\angle$ 4,5785
4	1,0373 $\angle$ -2,1877	1,0325 $\angle$ -2,2019	1,0281 $\angle$ -2,2091
5	1,0264 $\angle$ -3,9949	1,0011 $\angle$ -3,9466	1,0000 $\angle$ -3,9821
6	1,0218 $\angle$ -3,6130	1,0314 $\angle$ -3,7543	1,0164 $\angle$ -3,6821
7	1,0334 $\angle$ 3,6991	1,0279 $\angle$ 3,7325	1,0332 $\angle$ 3,5993
8	1,0220 $\angle$ 0,7663	1,0190 $\angle$ 0,7459	1,0331 $\angle$ 0,6139
9	1,0358 $\angle$ 2,0226	1,0366 $\angle$ 1,9633	1,0383 $\angle$ 1,8958

En un tercer escenario, se ha modificado el sistema aumentando en 30 MVar el valor de las cargas originales. En un cuarto escenario, se ha modificado el sistema disminuyendo en 30 MVar el valor de las cargas originales. Los valores de voltajes y ángulos, al ejecutar el flujo de carga, aumentado y reducido en 30 MVar el valor de las cargas y sin considerar la inclusión del STATCOM, se aprecian en las tablas 7 y 8.

Ahora, en los escenarios 1 y 2 se incluye el STATCOM para cada una de las barras en las que se encuentran ubicadas las cargas. Además, se considera un valor de reactancia de acoplamiento de 0,1 p.u. La salida del programa del flujo de carga con los valores de voltajes y ángulos, se muestran en las tablas 9 y 10, respectivamente.

Tabla 7: Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM.  
Sistema modificado, incrementado en 30 MVAR  
las cargas. Voltajes y ángulos.

Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,3250	1,0250 $\angle$ 9,2672	1,0250 $\angle$ 9,4791
3	1,0250 $\angle$ 4,6108	1,0250 $\angle$ 4,6734	1,0250 $\angle$ 4,7665
4	1,0153 $\angle$ -2,2506	1,0157 $\angle$ -2,2463	1,0228 $\angle$ -2,2296
5	0,9676 $\angle$ -3,9985	0,9875 $\angle$ -4,0616	0,9900 $\angle$ -4,0027
6	1,0043 $\angle$ -3,7649	0,9845 $\angle$ -3,5989	1,0078 $\angle$ -3,6996
7	1,0188 $\angle$ 3,7265	1,0225 $\angle$ 3,6893	1,0163 $\angle$ 3,8667
8	1,0103 $\angle$ 0,6799	1,0112 $\angle$ 0,6875	0,9939 $\angle$ 0,8632
9	1,0292 $\angle$ 1,9044	1,0259 $\angle$ 1,9584	1,0248 $\angle$ 2,0486

Tabla 8: Modelo IEEE 9 barras sin STATCOM.  
Sistema modificado, reducido en 30 MVAR las  
cargas. Voltajes y ángulos.

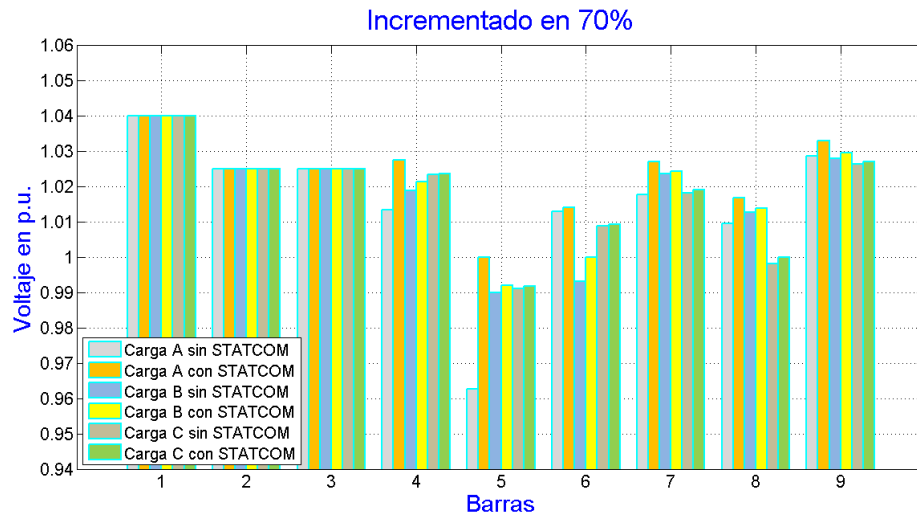
Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,2275	1,0250 $\angle$ 9,2798	1,0250 $\angle$ 9,0836
3	1,0250 $\angle$ 4,7058	1,0250 $\angle$ 4,6420	1,0250 $\angle$ 4,5587
4	1,0357 $\angle$ -2,1912	1,0353 $\angle$ -2,1968	1,0286 $\angle$ -2,2077
5	1,0221 $\angle$ -3,9930	1,0034 $\angle$ -3,9305	1,0010 $\angle$ -3,9811
6	1,0205 $\angle$ -3,6337	1,0392 $\angle$ -3,7840	1,0173 $\angle$ -3,6814
7	1,0323 $\angle$ 3,7028	1,0288 $\angle$ 3,7361	1,0349 $\angle$ 3,5722
8	1,0211 $\angle$ 0,7617	1,0203 $\angle$ 0,7517	1,0369 $\angle$ 0,5881
9	1,0353 $\angle$ 2,0156	1,0384 $\angle$ 1,9598	1,0396 $\angle$ 1,8794

Tabla 9: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM.  
Sistema modificado, incrementado en 70 % la  
carga. Voltajes y ángulos.

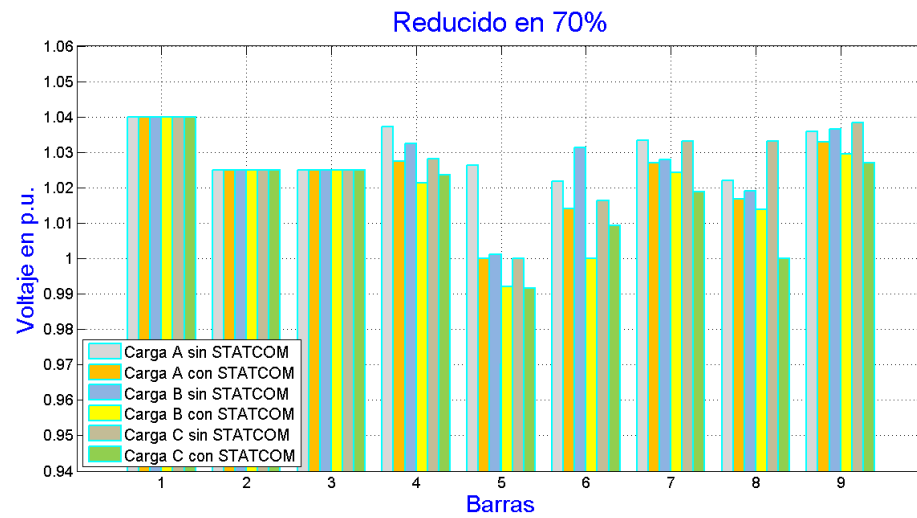
Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$	V $\angle$ $\theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,2720	1,0250 $\angle$ 9,2759	1,0250 $\angle$ 9,4248
3	1,0250 $\angle$ 4,6722	1,0250 $\angle$ 4,6707	1,0250 $\angle$ 4,7394
4	1,0274 $\angle$ -2,2121	1,0213 $\angle$ -2,2290	1,0236 $\angle$ -2,2257
5	1,0000 $\angle$ -3,9886	0,9920 $\angle$ -4,0201	0,9916 $\angle$ -3,9983
6	1,0140 $\angle$ -3,6762	1,0000 $\angle$ -3,6458	1,0092 $\angle$ -3,6956
7	1,0269 $\angle$ 3,7176	1,0243 $\angle$ 3,7077	1,0189 $\angle$ 3,8269
8	1,0167 $\angle$ 0,7339	1,0138 $\angle$ 0,7114	1,0000 $\angle$ 0,8268
9	1,0328 $\angle$ 1,9754	1,0295 $\angle$ 1,9650	1,0269 $\angle$ 2,0270
St	1,0398 $\angle$ -3,9886	1,0073 $\angle$ -3,6458	1,0026 $\angle$ 0,8268

En la figura 4, se realiza de manera gráfica, la comparación de las variaciones de voltaje en p.u. del sistema sin compensar y compensado, cuando las cargas bajo estudio han sido incrementadas en 70%; y en la figura 5, cuando las cargas han sido reducidas en 70%.





**Figura 4.** Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando en el sistema se ha incrementado el 70% de la carga.



**Figura 5.** Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando en el sistema se ha reducido el 70% de la carga.

Tabla 10: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM.  
Sistema modificado, reducido en 70 % la carga.  
Voltajes y ángulos

Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	$V \angle \theta$	$V \angle \theta$	$V \angle \theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,2720	1,0250 $\angle$ 9,2759	1,0250 $\angle$ 9,4248
3	1,0250 $\angle$ 4,6722	1,0250 $\angle$ 4,6707	1,0250 $\angle$ 4,7394
4	1,0274 $\angle$ -2,2121	1,0213 $\angle$ -2,2290	1,0236 $\angle$ -2,2257
5	1,0000 $\angle$ -3,9886	0,9920 $\angle$ -4,0201	0,9916 $\angle$ -3,9983
6	1,0140 $\angle$ -3,6762	1,0000 $\angle$ -3,6458	1,0092 $\angle$ -3,6956
7	1,0269 $\angle$ 3,7176	1,0243 $\angle$ 3,7077	1,0189 $\angle$ 3,8269
8	1,0167 $\angle$ 0,7339	1,0138 $\angle$ 0,7114	1,0000 $\angle$ 0,8269
9	1,0328 $\angle$ 1,9754	1,0295 $\angle$ 1,9650	1,0269 $\angle$ 2,0270
St	0,9698 $\angle$ -3,9886	0,9563 $\angle$ -3,6458	0,9536 $\angle$ 0,8268

Las potencias activas y reactivas en la barra en p.u.; y las potencias activas y reactivas en el STACOM en p.u. para

los escenarios 1 y 2 se muestran en las tablas 11 y 12 respectivamente.

Tabla 11: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM.  
Sistema modificado, incrementado en 70 % la carga. Potencias activas y reactivas.

PQ	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	[ MVar ]	[ MVar ]	[ MVar ]
PQbus	39.84	7.28	2.64
PQst	-41.43	-7.33	-2.65

Tabla 12: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM.  
Sistema modificado, reducido en 70 % la carga. Potencias activas y reactivas.

PQ	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	[ MVar ]	[ MVar ]	[ MVar ]
PQbus	-30.16	-34.72	-46.36
PQst	29.25	33.51	44.21

Ahora, en los escenarios 3 y 4, donde se incluye el modelo del STATCOM, la salida del programa del flujo de carga se obtiene los valores de voltajes y ángulos, ilustrados en las tablas 13 y 14, respectivamente.

Tabla 13: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado aumentado en 30 MVAR las cargas. Voltajes y ángulos.

Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	$V \angle \theta$	$V \angle \theta$	$V \angle \theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,3250	1,0250 $\angle$ 9,2672	1,0250 $\angle$ 9,4248
3	1,0250 $\angle$ 4,6108	1,0250 $\angle$ 4,6734	1,0250 $\angle$ 4,7394
4	1,0274 $\angle$ -2,2506	1,0213 $\angle$ -2,2463	1,0236 $\angle$ -2,2257
5	1,0000 $\angle$ -3,9985	0,9920 $\angle$ -4,0616	0,9916 $\angle$ -3,9983
6	1,0140 $\angle$ -3,7649	1,0000 $\angle$ -3,5989	1,0092 $\angle$ -3,6956
7	1,0269 $\angle$ 3,7265	1,0243 $\angle$ 3,6893	1,0189 $\angle$ 3,8269
8	1,0167 $\angle$ 0,6799	1,0138 $\angle$ 0,6875	1,0000 $\angle$ 0,8268
9	1,0328 $\angle$ 1,9044	1,0295 $\angle$ 1,9584	1,0269 $\angle$ 2,0270
St	1,0348 $\angle$ -3,9886	1,0163 $\angle$ -3,6458	1,0081 $\angle$ 0,8268

Tabla 14: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado disminuido en 30 MVAR las cargas. Voltajes y ángulos.

Bus	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	$V \angle \theta$	$V \angle \theta$	$V \angle \theta$
1	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000	1,0400 $\angle$ 0,0000
2	1,0250 $\angle$ 9,2720	1,0250 $\angle$ 9,2759	1,0250 $\angle$ 9,4248
3	1,0250 $\angle$ 4,6722	1,0250 $\angle$ 4,6707	1,0250 $\angle$ 4,7394
4	1,0274 $\angle$ -2,2121	1,0213 $\angle$ -2,2290	1,0236 $\angle$ -2,2257
5	1,0000 $\angle$ -3,9886	0,9920 $\angle$ -4,0201	0,9916 $\angle$ -3,9983
6	1,0140 $\angle$ -3,6762	1,0000 $\angle$ -3,6458	1,0092 $\angle$ -3,6956
7	1,0269 $\angle$ 3,7176	1,0243 $\angle$ 3,7077	1,0189 $\angle$ 3,8269
8	1,0167 $\angle$ 0,7339	1,0138 $\angle$ 0,7114	1,0000 $\angle$ 0,8269
9	1,0328 $\angle$ 1,9754	1,0295 $\angle$ 1,9650	1,0269 $\angle$ 2,0270
St	0,9748 $\angle$ -3,9886	0,9563 $\angle$ -3,6458	0,9481 $\angle$ 0,8268

En la figura 6 se realiza de manera gráfica la comparación de las variaciones de voltaje en p.u. del sistema sin compensar y compensado, cuando las cargas bajo estudio han sido aumentadas en 30 MVAR; y en la figura 7, cuando las cargas han sido disminuidas en 30 MVAR.

Las potencias activas y reactivas en el bus en p.u.; y las potencias activas y reactivas en STACOM en p.u., para el tercer y cuarto escenario, se muestran en las tablas 15 y 16, respectivamente. Los escenarios que contemplaron una reducción en la carga, es decir, cuando la carga en la barra se reduce tanto en

el 70 %, como restando 30 MVAR de la condición de carga normal, el SEP experimenta una condición de sobretensión; dando como resultado, que el STATCOM funcione en el modo inductivo, es decir, absorbiendo potencia reactiva. El modo inductivo de funcionamiento se puede concluir a partir de los valores positivos de Qbus. Los escenarios que contemplaron una sobrecarga, es decir, cuando la carga en la barra ha aumentado tanto en el 70 %, como sumando 30 MVAR de la condición de carga normal, el SEP experimenta una condición de subtensión; dando como resultado que el STATCOM funcione en el modo capacitivo, es decir, inyectando o suministrando potencia reactiva. El modo capacitivo de funcionamiento se puede concluir a partir de los valores negativos de Qbus.

Tabla 15: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado aumentado en 30 MVAR a las cargas. Potencias activas y reactivas.

PQ	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	[ MVar ]	[ MVar ]	[ MVar ]
PQbus	34.84	16.28	8.14
PQst	-36.05	-16.54	-8.21

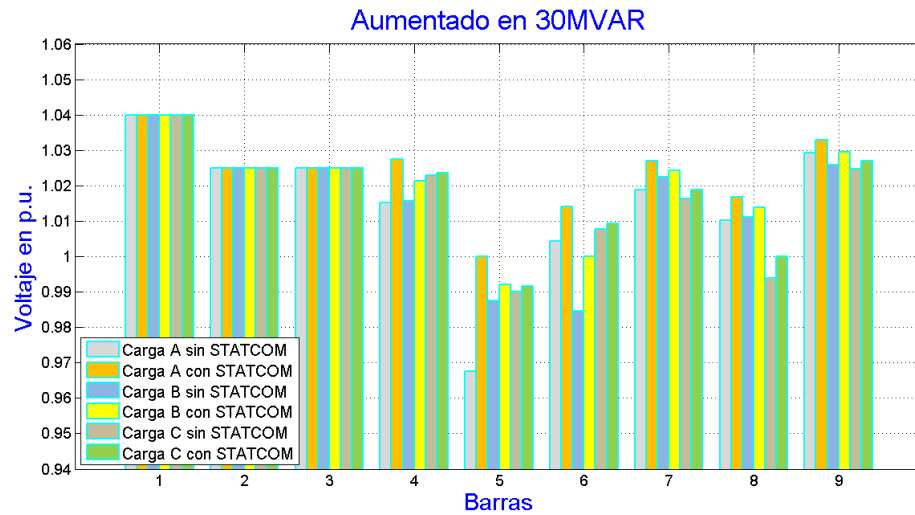
Tabla 16: Modelo IEEE 9 barras con STATCOM. Sistema modificado disminuido en 30 MVAR a las cargas. Potencias activas y reactivas.

PQ	En Carga A	En Carga B	En Carga C
	[ MVar ]	[ MVar ]	[ MVar ]
PQbus	-25.16	-43.72	-51.86
PQst	24.53	41.81	49.17

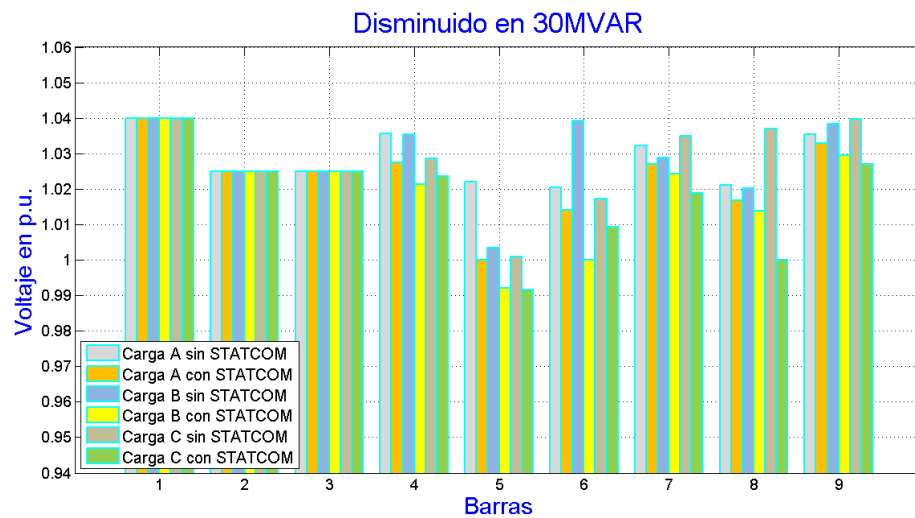
Bajo la condición de sobrecarga, la carga A, ubicada en la barra 5, es quien ha sufrido la mayor caída de tensión con un valor en p.u de 0,9627 $\angle$ -4,0017, sin embargo, con la inclusión del compensador el valor ha sido corregido a 1,0 $\angle$ -3,9886, con una inyección de potencia reactiva de 41,43 MVAR, mejorando no solamente el perfil de voltaje, sino también la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico. En el modo de perfil de baja tensión, la carga B, ubicada en la barra

6, es donde ha sufrido una sobretensión con un valor en p.u de  $1,0392 \angle -3,7840$  cuando ha disminuido 30 MVAR, pero al considerarse el STATCOM, el valor del perfil de voltaje ha sido mejorado a  $1,0 \angle -3,6458$  mediante la absorción de

potencia reactiva de 41,81 MVAR. En general, mejora el perfil de tensiones de la red, disminuyendo su efecto a medida que las barras se alejan del punto de instalación del equipo controlador.



**Figura 6.** Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando el sistema se ha aumentado en 30MVAR a la carga.



**Figura 7.** Voltajes en las barras en p.u., con y sin modelo STATCOM, cuando el sistema se ha disminuido en 30MVAR a la carga.

## 5. Conclusiones

En este trabajo, se adapta la metodología Esquivel-Acha para el estudio de un caso de 9 barras de IEEE, empleando las plataformas de simulación MATLAB y de MATHCAD. Se muestra el mejoramiento de los perfiles de tensión en el SEP bajo estudio y en todos los escenarios bajo análisis. Las barras más cercanas al equipo son las más beneficiadas, aliviando el sistema y consiguientemente mejorando la estabilidad y la confiabilidad del sistema eléctrico.

Se pudo adaptar y chequear la metodología Esquivel-Acha para un sistema de 9 barras estándar IEEE. Para futuros trabajos, se recomienda ampliar este algoritmo para equipos controladores en serie a la línea de transmisión y efectuar comparaciones con otros algoritmos que no impliquen la modificación de la matriz jacobiana.

## Referencias

- [1] D. Uthitsunthorn, U. Kwannetr, N. Sinsuphun, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, "Control of STATCOM by using optimal reactive power flow solutions," *Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. (ECTI-CON), 2010 Int. Conf.*, pp. 1181–1185, 2010.
- [2] M. Dogan, M. K. Dosoglu, D. Maden, S. Tosun, and A. Ozturk, "Investigation of the best placement for voltage stability by STATCOM," *2011 7th Int. Conf. Electr. Electron. Eng.*, no. 1, pp. I–117–I–121, 2011.
- [3] B. Varma and G. Vineesha, "Simulated control system design of a multilevel STATCOM for reactive power compensation," *Adv. ...*, pp. 257–263, 2012.
- [4] a. a. Edris *et al.*, "Proposed terms and definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 4, pp. 1848–1853, 1997.
- [5] R. Orizondo and R. Alves, "UPFC Simulation and Control Using the ATP/EMTP and MATLAB/Simulink Programs," pp. 1–7, 2006.
- [6] D. Jácome, "Localización y Dimensionamiento Óptimo de Dispositivos SVC Para la Compensación de Potencia Reactiva en SEP," 2017.
- [7] Deepmala and A. Kumar, "Impact of load models on distribution system performance and impact of D-STATCOM," *2014 6th IEEE Power India Int. Conf.*, pp. 1–6, 2014.
- [8] Y. Ma, A. Huang, and X. Zhou, "A review of STATCOM on the electric power system," *2015 IEEE Int. Conf. Mechatronics*

- Autom. ICMA 2015*, pp. 162–167, 2015.
- [9] B. Mahyavanshi, “A Study of Interaction between Dynamic Load and STATCOM,” pp. 392–396, 2006.
- [10] F. S. Al-Ismael and M. a. Abido, “The impact of STATCOM based stabilizers on power system stability, using intelligent computational optimization approach,” *2011 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. ISGT Asia 2011 Conf. Smarter Grid Sustain. Afford. Energy Futur.*, 2011.
- [11] G. Gong Hong, W. Wang Yuhong, and L. Li Yuan, “An improved control strategy of STATCOM for grid voltage unbalance compensation,” *TENCON 2015 - 2015 IEEE Reg. 10 Conf.*, pp. 1–4, 2015.
- [12] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. 2000.
- [13] D. J. Lee, E. W. Lee, J. H. Lee, and J. G. Kim, “Simulation of Static Synchronous Compensator (STATCOM),” pp. 1401–1403, 2005.
- [14] S. Khan and S. Bhowmick, “STATCOM Modeling for Power Flow Analysis,” pp. 1–6, 2014.
- [15] G. K. Venayagamoorthy *et al.*, “Effects of a STATCOM, a SCRC and a UPFC on the dynamic behavior of a 45 bus section of the Brazilian power system,” *2005 IEEE Power Eng. Soc. Inaug. Conf. Expo. Africa*, no. July, pp. 11–15, 2005.
- [16] S. Song, Y. He, X. Lin, and B. Liao, “Optimization control of STATCOM in power system with adaptive critic designs,” *3rd Int. Work. Adv. Comput. Intell. IWACI 2010*, pp. 122–126, 2010.
- [17] J. Liu, “Application of AC Converter in STATCOM,” pp. 2819–2822, 2012.
- [18] K. B. Nikilesh and P. N. Rao, “Harmonic compensation using D-STATCOM in combination with Renewable Energy Sources to enhance power quality,” *Int. Conf. Electr. Electron. Signals, Commun. Optim. EESCO 2015*, 2015.
- [19] V. M. Awasthi, “Reactive Power Compensation using STATCOM,” no. JANUARY 2014, pp. 583–585, 2015.
- [20] Z. Xinwen and T. Xiangqian, “Topology and Control Study for a Novel STATCOM,” vol. 2, pp. 1235–1240, 2016.
- [21] E. Acha and B. Kazemtabrizi, “A New STATCOM Model for Power Flows Using the Newton-Raphson Method,” *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2013.
- [22] M. M. Rostami, S. Soleymani, and B. Mozafari, “Improve the voltage profile of grid connected induction generator under load variation and symmetrical short circuit in the presence of SVC and STATCOM,” *2012 Proc. 17th Conf. Electr. Power Distrib. EPDC 2012*, 2012.
- [23] G. J. George, R. Rakesh, and M. Kowsalya, “Modeling of STATCOM under different loading conditions,” *2012 Int. Conf. Power, Signals, Control. Comput. EPSCICON 2012*, 2012.
- [24] D. A. J. Toctaquiza, “Control Flujo de Potencia del SNI de Ecuador en Base a Facts y Sistemas WAMS,” U.P.S., 2015.

- [25] P. J. Barnawal and S. M. Tripathi, "Non-linear load compensation using STATCOM," in *International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems, ICETEESES 2016*, 2016, no. 4, pp. 147–151.
- [26] S. Bhowmick, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS): Newton Power-Flow Modeling of Voltage-Sourced Converter-Based Controllers*, no. I. 2016.
- [27] Y. Xu, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems*, vol. 90. 2015.
- [28] A.-C. C. Acha E, Ambriz-Pérez H, Fuerte-Esquivel CR, *FACTS: modelling and simulation in power networks*, Wiley-Blackwell, New York. New York, 2004.
- [29] X. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*, vol. 4. 2006.
- [30] C. Angeles-Camacho, E. Acha, and E. Barrios-Martínez, "Three-phase STATCOM models for large-scale Newton-Raphson power flow studies," *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proc.*, pp. 1250–1255, 2007.

## 5.2 Estado del Arte

FLUJO DE CARGA PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA CON LA INCLUSIÓN DE UN MODELO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO																												
	DATOS				TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	POTENCIA REACTIVA	STATCOM	D_STATCOM	SVC	FACTS	SISTEMAS DE POTENCIA	FLUJOS DE POTENCIA	MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE TENSIÓN	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	MANTENER LA ESTABILIDAD	MEJORA EN REGIMEN PERMANENTE	CONDICIONES DE DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE	CONDICIONES DE PERTURBACIONES	CONDICIONES DE CARGA	LÍMITES DE POTENCIA REACTIVA	CONTROL DE TENSIÓN	COMPENSACIÓN EN PARALELO	COMPENSACION EN SERIE	COMPENSACION MIXTA	ALGORITMOS DE FLUJO DE POTENCIA	COMPENSACIÓN REACTIVA	USO DE DISPOSITOS STATCOM	METODO DE DESACOPLADO RÁPIDO	METODO DE NEWTON RAPHSON	
1	2010	Control of STATCOM by using optimal reactive power flow solutions	\cite{Uthitsunthorn, Kwannetr, Sinsuphun, Leeton, & Kulworawanichpong, 2010}	✗	✗	□	□	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□
2	2011	Investigation of the best placement for voltage stability by STATCOM	\cite{Dogan, Dosoglu, Maden, Tosun, & Ozturk, 2011}	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	✗	✗	□	□
3	2012	Simulated control system design of a multilevel STATCOM for reactive power compensation	\cite{Varma & Vineesha, 2012}	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	✗	✗	□	□	□	✗	✗	□	□
4	1997	Proposed terms and definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)	\cite{Edris et al., 1997}	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
5	2006	UPFC Simulation and Control Using the ATP/EMTP and MATLAB/Simulink Programs	\cite{Orizondo & Alves, 2006}	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□
6	2014	Impact of load models on distribution system performance and impact of D-STATCOM	\cite{IDeepmala & Kumar, 2014}	□	□	✗	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□
7	2015	A review of STATCOM on the electric power system,” 2015 IEEE	\cite{Ma, Huang, & Zhou, 2015}	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□
8	2006	A Study of Interaction between Dynamic Load and STATCOM	\cite{Mahyavanshi, 2006}	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□

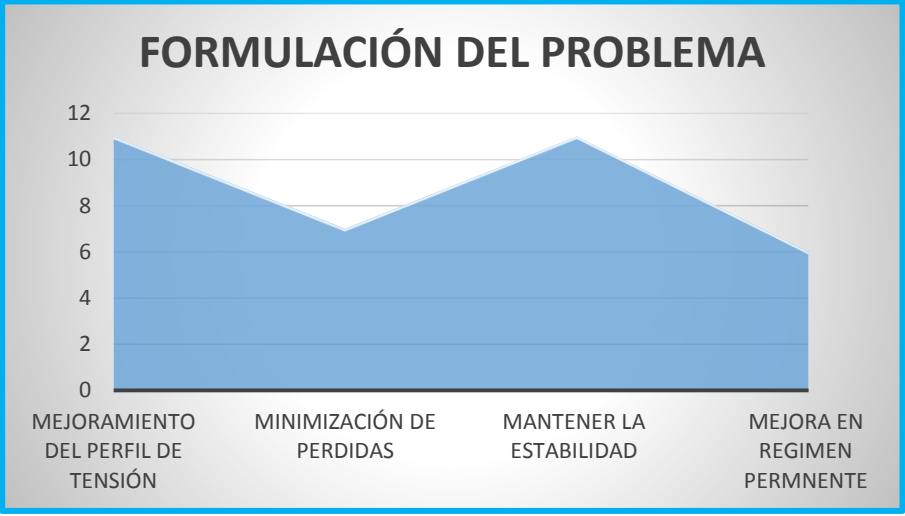
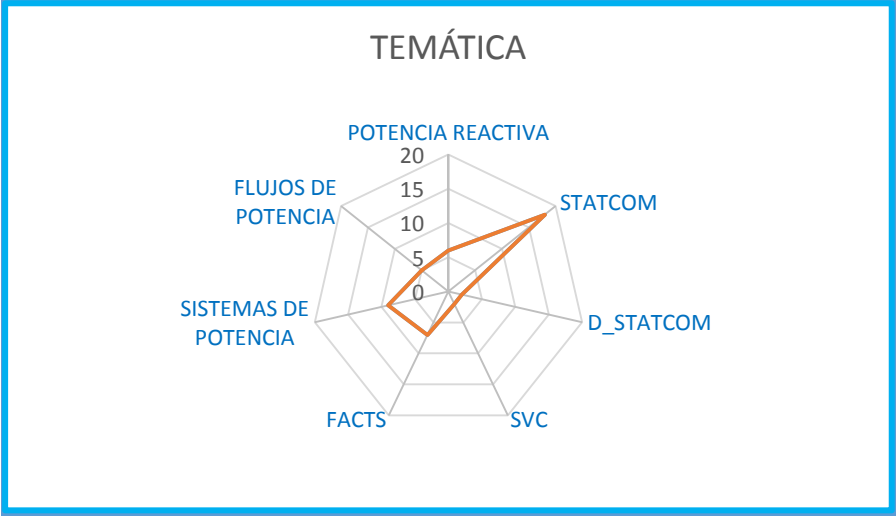
9	2011	The impact of STATCOM based stabilizers on power system stability, using intelligent computational optimization approach	\cite{Al-Ismail & Abido, 2011}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	2015	An improved control strategy of STATCOM for grid voltage unbalance compensation	\cite{Gong Hong, Wang Yuhong, & Li Yuan, 2015}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	2000	Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems	\cite{Hingorani & Gyugyi, 2000}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	2005	Simulation of Static Synchronous Compensator (STATCOM)	\cite{Lee, Lee, Lee, & Kim, 2005}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	2015	STATCOM Modeling for Power Flow Analysis	\cite{S. Khan and S. Bhowmick, 2015}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	2005	Effects of a STATCOM, a SCRC and a UPFC on the dynamic behavior of a 45 bus section of the Brazilian power system	\cite{G. K. Venayagamoorthy et al., 2005}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	2010	Optimization control of STATCOM in power system with adaptive critic designs	\cite{S. Song, Y. He, X. Lin, and B. Liao, 2010}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	2012	Application of AC Converter in STATCOM	\cite{J. Liu, 2012}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	2015	Harmonic compensation using D-STATCOM in combination with Renewable Energy Sources to enhance power quality	\cite{K. B. Nikilesh and P. N. Rao, 2015}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	2015	Reactive Power Compensation using STATCOM	\cite{I V. M. Awasthi, 2015}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	2016	Topology and Control Study for a Novel STATCOM	\cite{Z. Xinwen and T. Xiangqian, 2016}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	2013	A New STATCOM Model for Power Flows Using the Newton Raphson Method	\cite{E. Acha and B. Kazemtabrizi, 2013}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	2012	Improve the voltage profile of grid connected induction generator under load variation and symmetrical short circuit in the presence of SVC and STATCOM	\cite{M. M. Rostami, S. Soleymani, and B. Mozafari, 2012}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	2016	Non-linear load compensation using STATCOM	\cite{P. J. Barnawal and S. M. Tripathi, 2016}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	2016	Flexible AC Transmission Systems (FACTS): Newton Power-Flow Modeling of Voltage-Sourced Converter-Based Controller	\cite{S. Bhowmick, 2016}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	2015	Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems	\cite{Y. Xu, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, 2015}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25	2004	FACTS: modelling and simulation in power networks	\cite{A.-C. C. Acha E, Ambriz-Pérez H, Fuerte-Esquivel CR, 2004}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
26	2015	Análisis De Factibilidad Para La Compensación De Reactivo En Función Del Mínimo De Pérdidas En Redes De Distribución	\cite{F. Clavijo, A. Águila, 2015}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	2015	Control Flujo de Potencia del SNI de Ecuador en Base a Facts y Sistemas WAMS	\cite{J. Tactaquiza, D. Arias, 2015}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



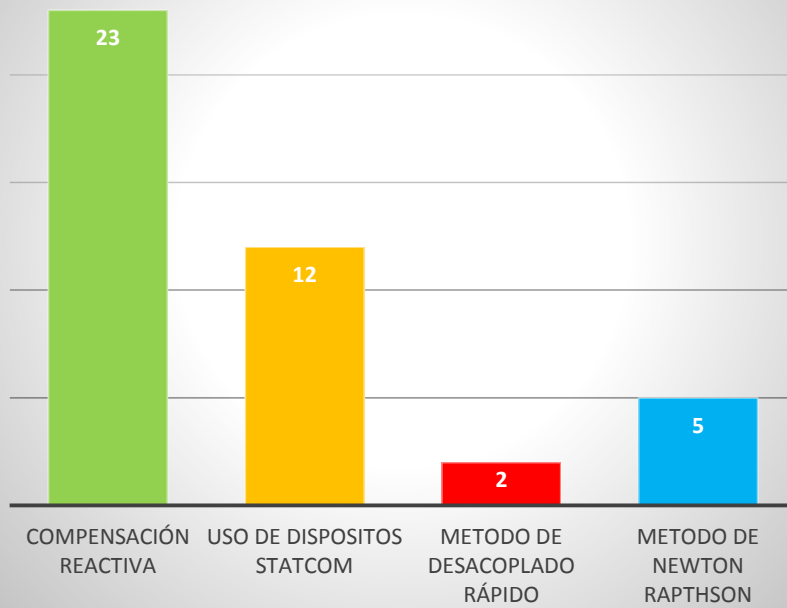
28	2014	Algoritmo para obtener la ubicación optima de compensadores Flexibles de Corriente Alterna para el mejoramiento de la capacidad de transmisión de un Sistema Eléctrico de Potencia	\cite{M. a. Córdova and F. a. Arévalo, 2014}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29	2017	Localización y Dimensionamiento Óptimo de Dispositivos SVC Para la Compensación de Potencia Reactiva en SEP	\cite{D. Jácome, A. Águila, 2017}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30	2017	Flujos Óptimos de Potencia Reactiva Basado en Óptimo Despacho de Carga Usando GAMS	\cite{I. Romero, S. Espinoza, 2017}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CANTIDAD:				6	18	2	2	7	9	5	11	7	11	6	13	1	8	7	13	14	8	5	5	23	12	2	5

TABLA 17.- MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE

TABLA 18.- RESUMEN E INDICADORES DEL ESTADO DEL ARTE



## SOLUCIÓN DADA MEDIANTE



## ANEXOS

Resolución del Flujo de carga para el Modelo IEEE 9 barras con STATCOM; cuyo sistema ha sido modificado, incrementado en 70 % la carga A, mediante la plataforma de Mathcad.

Ingreso de los parámetros de la red e información nodal:

Impedancias:

$z_{14} := 0.000 + 0.0576i$	$z_{78} := 0.0083 + 0.0720i$	$z_{96} := 0.0390 + 0.1700i$
$z_{27} := 0.000 + 0.0625i$	$z_{89} := 0.0119 + 0.1008i$	$z_{54} := 0.0100 + 0.0850i$
$z_{39} := 0.000 + 0.0586i$	$z_{75} := 0.0320 + 0.1610i$	$z_{46} := 0.0170 + 0.0920i$

Suceptancias:

$b_{14} := 0.000i$	$b_{78} := 0.0745i$	$b_{96} := 0.1790i$
$b_{27} := 0.000i$	$b_{89} := 0.1045i$	$b_{54} := 0.0880i$
$b_{39} := 0.000i$	$b_{75} := 0.1530i$	$b_{46} := 0.0790i$

Tipo de barras y potencias activas y reactivas especificadas:

1	Slack		
2	PV	$P_{2sp} := 1.63 - 0.00 = 1.63$	$Q_{2sp} := -0.00i$
3	PV	$P_{3sp} := 0.85 - 0.00 = 0.85$	$Q_{3sp} := -0.00i$
4	PQ	$P_{4sp} := 0.00 - 0.00 = 0.00$	$Q_{4sp} := -0.00i$
5	PQ	$P_{5sp} := 0.00 - 1.25 = -1.25$	$Q_{5sp} := -0.85i$
6	PQ	$P_{6sp} := 0.00 - 0.90 = -0.90$	$Q_{6sp} := -0.30i$
7	PQ	$P_{7sp} := 0.00 - 0.00 = 0.00$	$Q_{7sp} := -0.00i$
8	PQ	$P_{8sp} := 0.00 - 1.00 = -1.00$	$Q_{8sp} := -0.35i$
9	PQ	$P_{9sp} := 0.00 - 0.00 = -1.00$	$Q_{9sp} := -0.00i$

Ingreso de valores de inicialización de voltajes y ángulos:

V10:= 1.04    θ10:= 0.00  
V20:= 1.04    θ20:= 0.00  
V30:= 1.04    θ30:= 0.00  
V40:= 1.00    θ40:= 0.00  
V50:= 1.00    θ50:= 0.00  
V60:= 1.00    θ60:= 0.00  
V70:= 1.00    θ70:= 0.00  
V80:= 1.00    θ80:= 0.00  
V90:= 1.00    θ90:= 0.00

Creación de la Matriz Y bus:

$$Y := \begin{pmatrix} \frac{1}{z_{14}} & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{14}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{z_{27}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{27}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{z_{39}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{39}} & 0 \\ -\frac{1}{z_{14}} & 0 & 0 & \frac{1}{z_{14}} + \frac{1}{z_{46}} + \frac{1}{z_{54}} + \frac{b_{46}}{1} + \frac{b_{54}}{1} & -\frac{1}{z_{54}} & -\frac{1}{z_{46}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{54}} & \frac{1}{z_{54}} + \frac{1}{z_{75}} + \frac{b_{75}}{1} + \frac{b_{54}}{1} & 0 & -\frac{1}{z_{75}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{46}} & 0 & \frac{1}{z_{46}} + \frac{1}{z_{96}} + \frac{b_{46}}{1} + \frac{b_{96}}{1} & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{96}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{z_{27}} & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{75}} & 0 & \frac{1}{z_{27}} + \frac{1}{z_{78}} + \frac{1}{z_{75}} + \frac{b_{78}}{1} + \frac{b_{75}}{1} & -\frac{1}{z_{78}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{78}} & \frac{1}{z_{78}} + \frac{1}{z_{89}} + \frac{b_{78}}{1} + \frac{b_{89}}{1} & -\frac{1}{z_{89}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{z_{39}} & 0 & 0 & -\frac{1}{z_{96}} & 0 & -\frac{1}{z_{89}} & \frac{1}{z_{39}} + \frac{1}{z_{89}} + \frac{1}{z_{96}} + \frac{b_{89}}{1} + \frac{b_{96}}{1} \end{pmatrix}$$

Cálculo de las Ecuaciones de Potencia Activa Calculada y de Potencia Reactiva Calculada:

$$\begin{aligned}
 P1_{cal}(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
 = V1 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{0,0}).\cos(\theta1 - \theta1) + \text{Im}(Y_{0,0}).\sin(\theta1 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{0,1}).\cos(\theta1 - \theta2) + \text{Im}(Y_{0,1}).\sin(\theta1 - \theta2) \right) \right. \\
 + V3 \left( \text{Re}(Y_{0,2}).\cos(\theta1 - \theta3) + \text{Im}(Y_{0,2}).\sin(\theta1 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{0,3}).\cos(\theta1 - \theta4) + \text{Im}(Y_{0,3}).\sin(\theta1 - \theta4) \right) \\
 + V5 \left( \text{Re}(Y_{0,4}).\cos(\theta1 - \theta5) + \text{Im}(Y_{0,4}).\sin(\theta1 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{0,5}).\cos(\theta1 - \theta6) + \text{Im}(Y_{0,5}).\sin(\theta1 - \theta6) \right) \\
 + V7 \left( \text{Re}(Y_{0,6}).\cos(\theta1 - \theta7) + \text{Im}(Y_{0,6}).\sin(\theta1 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{0,8}).\cos(\theta1 - \theta8) + \text{Im}(Y_{0,7}).\sin(\theta1 - \theta8) \right) \\
 \left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{0,8}).\cos(\theta1 - \theta9) + \text{Im}(Y_{0,8}).\sin(\theta1 - \theta9) \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q1_{cal}(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
 = V1 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{0,0}).\sin(\theta1 - \theta1) - \text{Im}(Y_{0,0}).\cos(\theta1 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{0,1}).\sin(\theta1 - \theta2) - \text{Im}(Y_{0,1}).\cos(\theta1 - \theta2) \right) \right. \\
 + V3 \left( \text{Re}(Y_{0,2}).\sin(\theta1 - \theta3) - \text{Im}(Y_{0,2}).\cos(\theta1 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{0,3}).\sin(\theta1 - \theta4) - \text{Im}(Y_{0,3}).\cos(\theta1 - \theta4) \right) \\
 + V5 \left( \text{Re}(Y_{0,4}).\sin(\theta1 - \theta5) - \text{Im}(Y_{0,4}).\cos(\theta1 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{0,5}).\sin(\theta1 - \theta6) - \text{Im}(Y_{0,5}).\cos(\theta1 - \theta6) \right) \\
 + V7 \left( \text{Re}(Y_{0,6}).\sin(\theta1 - \theta7) - \text{Im}(Y_{0,6}).\cos(\theta1 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{0,8}).\sin(\theta1 - \theta8) - \text{Im}(Y_{0,7}).\cos(\theta1 - \theta8) \right) \\
 \left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{0,8}).\sin(\theta1 - \theta9) - \text{Im}(Y_{0,8}).\cos(\theta1 - \theta9) \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P2_{cal}(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
 = V2 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{1,0}).\cos(\theta2 - \theta1) + \text{Im}(Y_{1,0}).\sin(\theta2 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{1,1}).\cos(\theta2 - \theta2) + \text{Im}(Y_{1,1}).\sin(\theta2 - \theta2) \right) \right. \\
 + V3 \left( \text{Re}(Y_{1,2}).\cos(\theta2 - \theta3) + \text{Im}(Y_{1,2}).\sin(\theta2 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{1,3}).\cos(\theta2 - \theta4) + \text{Im}(Y_{1,3}).\sin(\theta2 - \theta4) \right) \\
 + V5 \left( \text{Re}(Y_{1,4}).\cos(\theta2 - \theta5) + \text{Im}(Y_{1,4}).\sin(\theta2 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{1,5}).\cos(\theta2 - \theta6) + \text{Im}(Y_{1,5}).\sin(\theta2 - \theta6) \right) \\
 + V7 \left( \text{Re}(Y_{1,6}).\cos(\theta2 - \theta7) + \text{Im}(Y_{1,6}).\sin(\theta2 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{1,8}).\cos(\theta2 - \theta8) + \text{Im}(Y_{1,7}).\sin(\theta2 - \theta8) \right) \\
 \left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{1,8}).\cos(\theta2 - \theta9) + \text{Im}(Y_{1,8}).\sin(\theta2 - \theta9) \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q2cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V2 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{1,0}).\sin(\theta2 - \theta1) - \text{Im}(Y_{1,0}).\cos(\theta2 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{1,1}).\sin(\theta2 - \theta2) - \text{Im}(Y_{1,1}).\cos(\theta2 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{1,2}).\sin(\theta2 - \theta3) - \text{Im}(Y_{1,2}).\cos(\theta2 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{1,3}).\sin(\theta2 - \theta4) - \text{Im}(Y_{1,3}).\cos(\theta2 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{1,4}).\sin(\theta2 - \theta5) - \text{Im}(Y_{1,4}).\cos(\theta2 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{1,5}).\sin(\theta2 - \theta6) - \text{Im}(Y_{1,5}).\cos(\theta2 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{1,6}).\sin(\theta2 - \theta7) - \text{Im}(Y_{1,6}).\cos(\theta2 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{1,8}).\sin(\theta2 - \theta8) - \text{Im}(Y_{1,7}).\cos(\theta2 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{1,8}).\sin(\theta2 - \theta9) - \text{Im}(Y_{1,8}).\cos(\theta2 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P3cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V3 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{2,0}).\cos(\theta3 - \theta1) + \text{Im}(Y_{2,0}).\sin(\theta3 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{2,1}).\cos(\theta3 - \theta2) + \text{Im}(Y_{2,1}).\sin(\theta3 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{2,2}).\cos(\theta3 - \theta3) + \text{Im}(Y_{2,2}).\sin(\theta3 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{2,3}).\cos(\theta3 - \theta4) + \text{Im}(Y_{2,3}).\sin(\theta3 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{2,4}).\cos(\theta3 - \theta5) + \text{Im}(Y_{2,4}).\sin(\theta3 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{2,5}).\cos(\theta3 - \theta6) + \text{Im}(Y_{2,5}).\sin(\theta3 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{2,6}).\cos(\theta3 - \theta7) + \text{Im}(Y_{2,6}).\sin(\theta3 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{2,8}).\cos(\theta3 - \theta8) + \text{Im}(Y_{2,7}).\sin(\theta3 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{2,8}).\cos(\theta3 - \theta9) + \text{Im}(Y_{2,8}).\sin(\theta3 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q3cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V3 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{2,0}).\sin(\theta3 - \theta1) - \text{Im}(Y_{2,0}).\cos(\theta3 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{2,1}).\sin(\theta3 - \theta2) - \text{Im}(Y_{2,1}).\cos(\theta3 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{2,2}).\sin(\theta3 - \theta3) - \text{Im}(Y_{2,2}).\cos(\theta3 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{2,3}).\sin(\theta3 - \theta4) - \text{Im}(Y_{2,3}).\cos(\theta3 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{2,4}).\sin(\theta3 - \theta5) - \text{Im}(Y_{2,4}).\cos(\theta3 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{2,5}).\sin(\theta3 - \theta6) - \text{Im}(Y_{2,5}).\cos(\theta3 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{2,6}).\sin(\theta3 - \theta7) - \text{Im}(Y_{2,6}).\cos(\theta3 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{2,8}).\sin(\theta3 - \theta8) - \text{Im}(Y_{2,7}).\cos(\theta3 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{2,8}).\sin(\theta3 - \theta9) - \text{Im}(Y_{2,8}).\cos(\theta3 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P4cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V4 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{3,0}).\cos(\theta4 - \theta1) + \text{Im}(Y_{3,0}).\sin(\theta4 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{3,1}).\cos(\theta4 - \theta2) + \text{Im}(Y_{3,1}).\sin(\theta4 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{3,2}).\cos(\theta4 - \theta3) + \text{Im}(Y_{3,2}).\sin(\theta4 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{3,3}).\cos(\theta4 - \theta4) + \text{Im}(Y_{3,3}).\sin(\theta4 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{3,4}).\cos(\theta4 - \theta5) + \text{Im}(Y_{3,4}).\sin(\theta4 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{3,5}).\cos(\theta4 - \theta6) + \text{Im}(Y_{3,5}).\sin(\theta4 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{3,6}).\cos(\theta4 - \theta7) + \text{Im}(Y_{3,6}).\sin(\theta4 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{3,8}).\cos(\theta4 - \theta8) + \text{Im}(Y_{3,7}).\sin(\theta4 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{3,8}).\cos(\theta4 - \theta9) + \text{Im}(Y_{3,8}).\sin(\theta4 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q4cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V3 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{3,0}).\sin(\theta4 - \theta1) - \text{Im}(Y_{3,0}).\cos(\theta4 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{3,1}).\sin(\theta4 - \theta2) - \text{Im}(Y_{3,1}).\cos(\theta4 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{3,2}).\sin(\theta4 - \theta3) - \text{Im}(Y_{3,2}).\cos(\theta4 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{3,3}).\sin(\theta4 - \theta4) - \text{Im}(Y_{3,3}).\cos(\theta4 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{3,4}).\sin(\theta4 - \theta5) - \text{Im}(Y_{3,4}).\cos(\theta4 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{3,5}).\sin(\theta4 - \theta6) - \text{Im}(Y_{3,5}).\cos(\theta4 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{3,6}).\sin(\theta4 - \theta7) - \text{Im}(Y_{3,6}).\cos(\theta4 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{3,8}).\sin(\theta4 - \theta8) - \text{Im}(Y_{3,7}).\cos(\theta4 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{3,8}).\sin(\theta4 - \theta9) - \text{Im}(Y_{3,8}).\cos(\theta4 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P5cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V5 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{4,0}).\cos(\theta5 - \theta1) + \text{Im}(Y_{4,0}).\sin(\theta5 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{4,1}).\cos(\theta5 - \theta2) + \text{Im}(Y_{4,1}).\sin(\theta5 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{4,2}).\cos(\theta5 - \theta3) + \text{Im}(Y_{4,2}).\sin(\theta5 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{4,3}).\cos(\theta5 - \theta4) + \text{Im}(Y_{4,3}).\sin(\theta5 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{4,4}).\cos(\theta5 - \theta5) + \text{Im}(Y_{4,4}).\sin(\theta5 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{4,5}).\cos(\theta5 - \theta6) + \text{Im}(Y_{4,5}).\sin(\theta5 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{4,6}).\cos(\theta5 - \theta7) + \text{Im}(Y_{4,6}).\sin(\theta5 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{4,8}).\cos(\theta5 - \theta8) + \text{Im}(Y_{4,7}).\sin(\theta5 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{4,8}).\cos(\theta5 - \theta9) + \text{Im}(Y_{4,8}).\sin(\theta5 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q5cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V5 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{4,0}).\sin(\theta5 - \theta1) - \text{Im}(Y_{4,0}).\cos(\theta5 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{4,1}).\sin(\theta5 - \theta2) - \text{Im}(Y_{4,1}).\cos(\theta5 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{4,2}).\sin(\theta5 - \theta3) - \text{Im}(Y_{4,2}).\cos(\theta5 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{4,3}).\sin(\theta5 - \theta4) - \text{Im}(Y_{4,3}).\cos(\theta5 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{4,4}).\sin(\theta5 - \theta5) - \text{Im}(Y_{4,4}).\cos(\theta5 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{4,5}).\sin(\theta5 - \theta6) - \text{Im}(Y_{4,5}).\cos(\theta5 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{4,6}).\sin(\theta5 - \theta7) - \text{Im}(Y_{4,6}).\cos(\theta5 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{4,8}).\sin(\theta5 - \theta8) - \text{Im}(Y_{4,7}).\cos(\theta5 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{4,8}).\sin(\theta5 - \theta9) - \text{Im}(Y_{4,8}).\cos(\theta5 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P6cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V6 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{5,0}).\cos(\theta6 - \theta1) + \text{Im}(Y_{5,0}).\sin(\theta6 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{5,1}).\cos(\theta6 - \theta2) + \text{Im}(Y_{5,1}).\sin(\theta6 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{5,2}).\cos(\theta6 - \theta3) + \text{Im}(Y_{5,2}).\sin(\theta6 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{5,3}).\cos(\theta6 - \theta4) + \text{Im}(Y_{5,3}).\sin(\theta6 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{5,4}).\cos(\theta6 - \theta5) + \text{Im}(Y_{5,4}).\sin(\theta6 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{5,5}).\cos(\theta6 - \theta6) + \text{Im}(Y_{5,5}).\sin(\theta6 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{5,6}).\cos(\theta6 - \theta7) + \text{Im}(Y_{5,6}).\sin(\theta6 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{5,8}).\cos(\theta6 - \theta8) + \text{Im}(Y_{5,7}).\sin(\theta6 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{5,8}).\cos(\theta6 - \theta9) + \text{Im}(Y_{5,8}).\sin(\theta6 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q6cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V6 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{5,0}).\sin(\theta6 - \theta1) - \text{Im}(Y_{5,0}).\cos(\theta6 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{5,1}).\sin(\theta6 - \theta2) - \text{Im}(Y_{5,1}).\cos(\theta6 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{5,2}).\sin(\theta6 - \theta3) - \text{Im}(Y_{5,2}).\cos(\theta6 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{5,3}).\sin(\theta6 - \theta4) - \text{Im}(Y_{5,3}).\cos(\theta6 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{5,4}).\sin(\theta6 - \theta5) - \text{Im}(Y_{5,4}).\cos(\theta6 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{5,5}).\sin(\theta6 - \theta6) - \text{Im}(Y_{5,5}).\cos(\theta6 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{5,6}).\sin(\theta6 - \theta7) - \text{Im}(Y_{5,6}).\cos(\theta6 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{5,8}).\sin(\theta6 - \theta8) - \text{Im}(Y_{5,7}).\cos(\theta6 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{5,8}).\sin(\theta6 - \theta9) - \text{Im}(Y_{5,8}).\cos(\theta6 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& P7_{cal}(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V7 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{6,0}).\cos(\theta7 - \theta1) + \text{Im}(Y_{6,0}).\sin(\theta7 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{6,1}).\cos(\theta7 - \theta2) + \text{Im}(Y_{6,1}).\sin(\theta7 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{6,2}).\cos(\theta7 - \theta3) + \text{Im}(Y_{6,2}).\sin(\theta7 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{6,3}).\cos(\theta7 - \theta4) + \text{Im}(Y_{6,3}).\sin(\theta7 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{6,4}).\cos(\theta7 - \theta5) + \text{Im}(Y_{6,4}).\sin(\theta7 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{6,5}).\cos(\theta7 - \theta6) + \text{Im}(Y_{6,5}).\sin(\theta7 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{6,6}).\cos(\theta7 - \theta7) + \text{Im}(Y_{6,6}).\sin(\theta7 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{6,8}).\cos(\theta7 - \theta8) + \text{Im}(Y_{6,7}).\sin(\theta7 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{6,8}).\cos(\theta7 - \theta9) + \text{Im}(Y_{6,8}).\sin(\theta7 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q7_{cal}(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V7 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{6,0}).\sin(\theta7 - \theta1) - \text{Im}(Y_{6,0}).\cos(\theta7 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{6,1}).\sin(\theta7 - \theta2) - \text{Im}(Y_{6,1}).\cos(\theta7 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{6,2}).\sin(\theta7 - \theta3) - \text{Im}(Y_{6,2}).\cos(\theta7 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{6,3}).\sin(\theta7 - \theta4) - \text{Im}(Y_{6,3}).\cos(\theta7 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{6,4}).\sin(\theta7 - \theta5) - \text{Im}(Y_{6,4}).\cos(\theta7 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{6,5}).\sin(\theta7 - \theta6) - \text{Im}(Y_{6,5}).\cos(\theta7 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{6,6}).\sin(\theta7 - \theta7) - \text{Im}(Y_{6,6}).\cos(\theta7 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{6,8}).\sin(\theta7 - \theta8) - \text{Im}(Y_{6,7}).\cos(\theta7 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{6,8}).\sin(\theta7 - \theta9) - \text{Im}(Y_{6,8}).\cos(\theta7 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P8_{cal}(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V8 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{7,0}).\cos(\theta8 - \theta1) + \text{Im}(Y_{7,0}).\sin(\theta8 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{7,1}).\cos(\theta8 - \theta2) + \text{Im}(Y_{7,1}).\sin(\theta8 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{7,2}).\cos(\theta8 - \theta3) + \text{Im}(Y_{7,2}).\sin(\theta8 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{7,3}).\cos(\theta8 - \theta4) + \text{Im}(Y_{7,3}).\sin(\theta8 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{7,4}).\cos(\theta8 - \theta5) + \text{Im}(Y_{7,4}).\sin(\theta8 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{7,5}).\cos(\theta8 - \theta6) + \text{Im}(Y_{7,5}).\sin(\theta8 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{7,6}).\cos(\theta8 - \theta7) + \text{Im}(Y_{7,6}).\sin(\theta8 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{7,8}).\cos(\theta8 - \theta8) + \text{Im}(Y_{7,7}).\sin(\theta8 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{7,8}).\cos(\theta8 - \theta9) + \text{Im}(Y_{7,8}).\sin(\theta8 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q8cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V8 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{7,0}).\sin(\theta8 - \theta1) - \text{Im}(Y_{7,0}).\cos(\theta8 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{7,1}).\sin(\theta8 - \theta2) - \text{Im}(Y_{7,1}).\cos(\theta8 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{7,2}).\sin(\theta8 - \theta3) - \text{Im}(Y_{7,2}).\cos(\theta8 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{7,3}).\sin(\theta8 - \theta4) - \text{Im}(Y_{7,3}).\cos(\theta8 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{7,4}).\sin(\theta8 - \theta5) - \text{Im}(Y_{7,4}).\cos(\theta8 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{7,5}).\sin(\theta8 - \theta6) - \text{Im}(Y_{7,5}).\cos(\theta8 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{7,6}).\sin(\theta8 - \theta7) - \text{Im}(Y_{7,6}).\cos(\theta8 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{7,8}).\sin(\theta8 - \theta8) - \text{Im}(Y_{7,7}).\cos(\theta8 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{7,8}).\sin(\theta8 - \theta9) - \text{Im}(Y_{7,8}).\cos(\theta8 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P9cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V9 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{8,0}).\cos(\theta9 - \theta1) + \text{Im}(Y_{8,0}).\sin(\theta9 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{8,1}).\cos(\theta9 - \theta2) + \text{Im}(Y_{8,1}).\sin(\theta9 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{8,2}).\cos(\theta9 - \theta3) + \text{Im}(Y_{8,2}).\sin(\theta9 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{8,3}).\cos(\theta9 - \theta4) + \text{Im}(Y_{8,3}).\sin(\theta9 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{8,4}).\cos(\theta9 - \theta5) + \text{Im}(Y_{8,4}).\sin(\theta9 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{8,5}).\cos(\theta9 - \theta6) + \text{Im}(Y_{8,5}).\sin(\theta9 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{8,6}).\cos(\theta9 - \theta7) + \text{Im}(Y_{8,6}).\sin(\theta9 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{8,8}).\cos(\theta9 - \theta8) + \text{Im}(Y_{8,7}).\sin(\theta9 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{8,8}).\cos(\theta9 - \theta9) + \text{Im}(Y_{8,8}).\sin(\theta9 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q9cal(V1, \theta1, V2, \theta2, V3, \theta3, V4, \theta4, V5, \theta5, V6, \theta6, V7, \theta7, V8, \theta8, V9, \theta9) \\
&= V9 \left[ V1 \left( \text{Re}(Y_{8,0}).\sin(\theta9 - \theta1) - \text{Im}(Y_{8,0}).\cos(\theta9 - \theta1) \right) + V2 \left( \text{Re}(Y_{8,1}).\sin(\theta9 - \theta2) - \text{Im}(Y_{8,1}).\cos(\theta9 - \theta2) \right) \right. \\
&+ V3 \left( \text{Re}(Y_{8,2}).\sin(\theta9 - \theta3) - \text{Im}(Y_{8,2}).\cos(\theta9 - \theta3) \right) + V4 \left( \text{Re}(Y_{8,3}).\sin(\theta9 - \theta4) - \text{Im}(Y_{8,3}).\cos(\theta9 - \theta4) \right) \\
&+ V5 \left( \text{Re}(Y_{8,4}).\sin(\theta9 - \theta5) - \text{Im}(Y_{8,4}).\cos(\theta9 - \theta5) \right) + V6 \left( \text{Re}(Y_{8,5}).\sin(\theta9 - \theta6) - \text{Im}(Y_{8,5}).\cos(\theta9 - \theta6) \right) \\
&+ V7 \left( \text{Re}(Y_{8,6}).\sin(\theta9 - \theta7) - \text{Im}(Y_{8,6}).\cos(\theta9 - \theta7) \right) + V8 \left( \text{Re}(Y_{8,8}).\sin(\theta9 - \theta8) - \text{Im}(Y_{8,7}).\cos(\theta9 - \theta8) \right) \\
&\left. + V9 \left( \text{Re}(Y_{8,8}).\sin(\theta9 - \theta9) - \text{Im}(Y_{8,8}).\cos(\theta9 - \theta9) \right) \right]
\end{aligned}$$

# Valores obtenidos de Potencia Activa Calculada y de Potencia Reactiva Calculada

P10cal	P1cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	
Q10cal	Q1cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	0
P20cal	P2cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	1 0.7222
Q20cal	Q2cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	2 0
P30cal	P3cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	3 0.41
Q30cal	Q3cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	4 0
P40cal	P4cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	5 0.4373
Q40cal	Q4cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	6 0
P50cal	P5cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	7 -0.8614
Q50cal	Q5cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	8 0
P60cal	P6cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	9 -0.241
Q60cal	Q6cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	10 0
P70cal	P7cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	11 -0.258
Q70cal	Q7cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	12 0
P80cal	P8cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	13 -0.6275
Q80cal	Q8cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	14 0
P90cal	P9cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	15 -0.179
Q90cal	Q9cal(V10, θ10, V20, θ20, V30, θ30, V40, θ40, V50, θ50, V60, θ60, V70, θ70, V80, θ80, V90, θ90)	16 0
		17 -0.7101

Estimación de error y una máxima iteración.

$\epsilon := 1e-12$

Itmax:= 100

Cálculo de  $\Delta P_i$  y  $\Delta Q_i$ :

$\Delta P_{10}$	0		0
$\Delta Q_{10}$	0	0	0
$\Delta P_{20}$	$P_{2sp} - P_{20cal}$	1	0
$\Delta Q_{20}$	0	2	1.63
$\Delta P_{30}$	$P_{3sp} - P_{30cal}$	3	0
$\Delta Q_{30}$	0	4	0.85
$\Delta P_{40}$	$P_{4sp} - P_{40cal}$	5	0
$\Delta Q_{40}$	$Q_{4sp} - Q_{40cal}$	6	0
$\Delta P_{50}$	$P_{5sp} - P_{50cal}$	7	0.8614
$\Delta Q_{50}$	$Q_{5sp} - Q_{50cal}$	8	-1.25
$\Delta P_{60}$	$P_{6sp} - P_{60cal}$	9	-0.609
$\Delta Q_{60}$	$Q_{6sp} - Q_{60cal}$	10	-0.9
$\Delta P_{70}$	$P_{7sp} - P_{70cal}$	11	-0.042
$\Delta Q_{70}$	$Q_{7sp} - Q_{70cal}$	12	0
$\Delta P_{80}$	$P_{8sp} - P_{80cal}$	13	0.6275
$\Delta Q_{80}$	$Q_{8sp} - Q_{80cal}$	14	-1
$\Delta P_{90}$	$P_{9sp} - P_{90cal}$	15	-0.171
$\Delta Q_{90}$	$Q_{9sp} - Q_{90cal}$	16	0
		17	0.7101

### Construcción de la matriz Jacobiana:

[illegible]

$V_{\theta 0} := \theta_{10}, V_{20}, \theta_{20}, V_{30}, \theta_{30}, V_{40}, \theta_{40}, V_{50}, \theta_{50}, V_{60}, \theta_{60}, V_{70}, \theta_{70}, V_{80}, \theta_{80}, V_{90}, \theta_{90}$

Sustituir el valor de  $V_{\theta 0}$  para cada una de las derivadas de la matriz jacobiana, donde:

Cálculo del vector de apartamiento:

$$F_0 := - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ P_{2sp} - P_{20cal} \\ 0 \\ P_{3sp} - P_{30cal} \\ 0 \\ P_{4sp} - P_{40cal} \\ Q_{4sp} - Q_{40cal} \\ P_{5sp} - P_{50cal} \\ Q_{5sp} - Q_{50cal} \\ P_{6sp} - P_{60cal} \\ Q_{6sp} - Q_{60cal} \\ P_{7sp} - P_{70cal} \\ Q_{7sp} - Q_{70cal} \\ P_{8sp} - P_{80cal} \\ Q_{8sp} - Q_{80cal} \\ P_{9sp} - P_{90cal} \\ Q_{9sp} - Q_{90cal} \end{pmatrix} = \begin{array}{c|c} & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 2 & -1.63 \\ 3 & 0 \\ 4 & -0.85 \\ 5 & 0 \\ 6 & 0 \\ 7 & -0.8614 \\ 8 & 1.25 \\ 9 & 0.609 \\ 10 & 0.9 \\ 11 & 0.042 \\ 12 & 0 \\ 13 & -0.6275 \\ 14 & 1 \\ 15 & 0.171 \\ 16 & 0 \\ 17 & -0.7101 \end{array}$$

Cálculo de  $\Delta V_i$  y  $\Delta \theta_i$ :

$\Delta \theta_{10}$		0
$\Delta V_{10}$	0	0
$\Delta \theta_{20}$	1	0
$\Delta V_{20}$	2	0.1707
$\Delta \theta_{30}$	3	0
$\Delta V_{30}$	4	0.0886
$\Delta \theta_{40}$	5	0
$\Delta V_{40}$	6	-0.0371
$\Delta \theta_{50}$	7	0.0215
$\Delta V_{50}$	8	-0.0645
$\Delta \theta_{60}$	9	-0.0224
$\Delta V_{60}$	10	-0.0634
$\Delta \theta_{70}$	11	0.0131
$\Delta V_{70}$	12	0.0713
$\Delta \theta_{80}$	13	0.0294
$\Delta V_{80}$	14	0.0171
$\Delta \theta_{90}$	15	0.0204
$\Delta V_{90}$	16	0.04
	17	0.0363

$\Delta \theta_i := J_0^{-1} \cdot -F_0 =$

Actualizar las variables  $V_i$  y  $\theta_i$  :

$\begin{pmatrix} \theta_{11} \\ V_{11} \\ \theta_{21} \\ V_{21} \\ \theta_{31} \\ V_{31} \\ \theta_{41} \\ V_{41} \\ \theta_{51} \\ V_{51} \\ \theta_{61} \\ V_{61} \\ \theta_{71} \\ V_{71} \\ \theta_{81} \\ V_{81} \\ \theta_{91} \\ V_{91} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1.04 \\ \theta_{20} \\ V_{20} \\ \theta_{30} \\ V_{30} \\ \theta_{40} \\ V_{40} \\ \theta_{50} \\ V_{50} \\ \theta_{60} \\ V_{60} \\ \theta_{70} \\ V_{70} \\ \theta_{80} \\ V_{80} \\ \theta_{90} \\ V_{90} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta\theta_{20} \\ \Delta V_{20} \cdot V_{20} \\ \Delta\theta_{30} \\ \Delta V_{30} \cdot V_{30} \\ \Delta\theta_{40} \\ \Delta V_{40} \cdot V_{40} \\ \Delta\theta_{50} \\ \Delta V_{50} \cdot V_{50} \\ \Delta\theta_{60} \\ \Delta V_{60} \cdot V_{60} \\ \Delta\theta_{70} \\ \Delta V_{70} \cdot V_{70} \\ \Delta\theta_{80} \\ \Delta V_{80} \cdot V_{80} \\ \Delta\theta_{90} \\ \Delta V_{90} \cdot V_{90} \end{pmatrix}$	$=$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.04 \\ 0.1707 \\ 1.025 \\ 0.0886 \\ 1.025 \\ -0.0371 \\ 1.0215 \\ -0.0645 \\ 0.9776 \\ -0.0634 \\ 1.0131 \\ 0.0713 \\ 1.0294 \\ 0.0171 \\ 1.0204 \\ 0.04 \\ 1.0363 \end{pmatrix}$
---	---	--	-----	---



No cumple con la estimación de error. En el ejercicio, cumple tal criterio en la 4ta iteración; obteniendo la Jacobiana, denominada como antigua:

[illegible]

Valores obtenidos de la matriz jacobiana que cumple el criterio de convergencia.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	16.6086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16.6086	1.63	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	17.9721	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17.9721	0.85
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	40.3718	3.3968	-11.3569	-0.9867	-10.7311	-1.6895	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	-3.3968	40.3718	0.9867	-11.3569	1.6895	-10.7311	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	-11.2758	-1.676	16.9197	1.116	0	0	-5.644	-1.94	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1.676	-11.2758	-3.616	15.2197	0	0	1.94	-5.644	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	-10.6262	-2.257	0	0	16.232	2.3427	0	0	0	0	-5.6058	-1.8858
11	0	0	0	0	0	0	2.257	-10.6262	0	0	-4.1427	15.632	0	0	0	0	1.8858	-5.6058
12	0	0	-16.6086	0	0	0	0	0	-5.9569	-0.3657	0	0	36.7034	2.9042	-14.1379	-0.9085	0	0
13	0	0	1.63	0	0	0	0	0	0.3657	-5.9569	0	0	-2.9042	36.7034	0.9085	-14.1379	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13.9608	-2.4087	24.0914	1.8243	-10.1306	-1.4157
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.4087	-13.9608	-3.8243	23.3914	1.4157	-10.1306
16	0	0	0	0	-17.9721	0	0	0	0	0	-5.8672	-0.7463	0	0	-10.1818	-0.9823	34.0211	2.5786
17	0	0	0	0	0.85	0	0	0	0	0	0.7463	-5.8672	0	0	0.9823	-10.1818	-2.5786	34.0211

Ingreso de los parámetros del bus al que se conecta el STATCOM ( $V_k$  y  $\theta_k$ ):

$$\theta_{k0} = 0$$

$$V_k = 1.00$$

Ingreso de los parámetros y valores de inicialización del STATCOM:

$$X_{vr} = 0.01i$$

$$G_{vr} = 0.00$$

$$B_{vr} = 10$$

$$V_{vr0} = 1.00$$

$$\theta_{vr0} = 0.00$$

Se establece una estimación de error y una máxima iteración de:

$$\varepsilon = 1e-12$$

$$It_{max} = 100$$

Cálculo de  $P_k$  y  $Q_k$  con las ecuaciones:

$$P_k(V_k, \theta_k, V_{vr}, \theta_{vr}) := V_k^2 \cdot G_{vr} - V_k \cdot V_{vr} \cdot (G_{vr} \cdot \cos(\theta_k - \theta_{vr}) + B_{vr} \cdot \sin(\theta_k - \theta_{vr}))$$

$$Q_k(V_k, \theta_k, V_{vr}, \theta_{vr}) := -V_k^2 \cdot B_{vr} + V_k \cdot V_{vr} \cdot (G_{vr} \cdot \sin(\theta_k - \theta_{vr}) - B_{vr} \cos(\theta_k - \theta_{vr}))$$

Cálculo de  $P_{st}$  y  $Q_{st}$ , con las ecuaciones:

$$P_{vr}(V_k, \theta_k, V_{vr}, \theta_{vr}) := V_{vr}^2 \cdot G_{vr} - V_{vr} \cdot V_k \cdot (G_{vr} \cdot \cos(\theta_{vr} - \theta_k) + B_{vr} \cdot \sin(\theta_{vr} - \theta_k))$$

$$Q_{vr}(V_k, \theta_k, V_{vr}, \theta_{vr}) := -V_{vr}^2 \cdot B_{vr} + V_{vr} \cdot V_k \cdot (G_{vr} \cdot \sin(\theta_{vr} - \theta_k) - B_{vr} \cdot \cos(\theta_{vr} - \theta_k))$$

Cálculo de la nueva matriz jacobiana  $J_{new}$ :

$J_a := \left( \frac{d}{d\theta_{k0}} P_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_e := \left[ \left( \frac{d}{dV_{k0}} P_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{k0} \right]$
$J_b := \left( \frac{d}{d\theta_{k0}} Q_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_f := \left[ \left( \frac{d}{dV_{k0}} Q_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{k0} \right]$
$J_c := \left( \frac{d}{d\theta_{k0}} P_{vr}(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_g := \left[ \left( \frac{d}{dV_{k0}} P_{vr}(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{k0} \right]$
$J_d := \left( \frac{d}{d\theta_{k0}} Q_{vr}(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_h := \left[ \left( \frac{d}{dV_{k0}} Q_{vr}(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{k0} \right]$
$J_i := \left( \frac{d}{d\theta_{vr0}} P_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_m := \left[ \left( \frac{d}{dV_{vr0}} P_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{vr0} \right]$
$J_j := \left( \frac{d}{d\theta_{vr0}} Q_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_n := \left[ \left( \frac{d}{dV_{vr0}} P_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{vr0} \right]$
$J_k := \left( \frac{d}{d\theta_{vr0}} P_{vr}(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_o := \left[ \left( \frac{d}{dV_{vr0}} Q_k(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{vr0} \right]$
$J_l := \left( \frac{d}{d\theta_{vr0}} Q_{vr}(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right)$	$J_p := \left[ \left( \frac{d}{dV_{vr0}} Q_{vr}(V_{k0}, \theta_{k0}, V_{vr0}, \theta_{vr0}) \right) \cdot V_{vr0} \right]$

JS :=	$J^4_{0,0}$	$J^4_{0,1}$	$J^4_{0,2}$	$J^4_{0,3}$	$J^4_{0,4}$	$J^4_{0,5}$	$J^4_{0,6}$	$J^4_{0,7}$	$J^4_{0,8}$	0	$J^4_{0,10}$	$J^4_{0,11}$	$J^4_{0,12}$	$J^4_{0,13}$	$J^4_{0,14}$	$J^4_{0,15}$	$J^4_{0,16}$	$J^4_{0,17}$	0	0
	$J^4_{1,0}$	$J^4_{1,1}$	$J^4_{1,2}$	$J^4_{1,3}$	$J^4_{1,4}$	$J^4_{1,5}$	$J^4_{1,6}$	$J^4_{1,7}$	$J^4_{1,8}$	0	$J^4_{1,10}$	$J^4_{1,11}$	$J^4_{1,12}$	$J^4_{1,13}$	$J^4_{1,14}$	$J^4_{1,15}$	$J^4_{1,16}$	$J^4_{1,17}$	0	0
	$J^4_{2,0}$	$J^4_{2,1}$	$J^4_{2,2}$	$J^4_{2,3}$	$J^4_{2,4}$	$J^4_{2,5}$	$J^4_{2,6}$	$J^4_{2,7}$	$J^4_{2,8}$	0	$J^4_{2,10}$	$J^4_{2,11}$	$J^4_{2,12}$	$J^4_{2,13}$	$J^4_{2,14}$	$J^4_{2,15}$	$J^4_{2,16}$	$J^4_{2,17}$	0	0
	$J^4_{3,0}$	$J^4_{3,1}$	$J^4_{3,2}$	$J^4_{3,3}$	$J^4_{3,4}$	$J^4_{3,5}$	$J^4_{3,6}$	$J^4_{3,7}$	$J^4_{3,8}$	0	$J^4_{3,10}$	$J^4_{3,11}$	$J^4_{3,12}$	$J^4_{3,13}$	$J^4_{3,14}$	$J^4_{3,15}$	$J^4_{3,16}$	$J^4_{3,17}$	0	0
	$J^4_{4,0}$	$J^4_{4,1}$	$J^4_{4,2}$	$J^4_{4,3}$	$J^4_{4,4}$	$J^4_{4,5}$	$J^4_{4,6}$	$J^4_{4,7}$	$J^4_{4,8}$	0	$J^4_{4,10}$	$J^4_{4,11}$	$J^4_{4,12}$	$J^4_{4,13}$	$J^4_{4,14}$	$J^4_{4,15}$	$J^4_{4,16}$	$J^4_{4,17}$	0	0
	$J^4_{5,0}$	$J^4_{5,1}$	$J^4_{5,2}$	$J^4_{5,3}$	$J^4_{5,4}$	$J^4_{5,5}$	$J^4_{5,6}$	$J^4_{5,7}$	$J^4_{5,8}$	0	$J^4_{5,10}$	$J^4_{5,11}$	$J^4_{5,12}$	$J^4_{5,13}$	$J^4_{5,14}$	$J^4_{5,15}$	$J^4_{5,16}$	$J^4_{5,17}$	0	0
	$J^4_{6,0}$	$J^4_{6,1}$	$J^4_{6,2}$	$J^4_{6,3}$	$J^4_{6,4}$	$J^4_{6,5}$	$J^4_{6,6}$	$J^4_{6,7}$	$J^4_{6,8}$	0	$J^4_{6,10}$	$J^4_{6,11}$	$J^4_{6,12}$	$J^4_{6,13}$	$J^4_{6,14}$	$J^4_{6,15}$	$J^4_{6,16}$	$J^4_{6,17}$	0	0
	$J^4_{7,0}$	$J^4_{7,1}$	$J^4_{7,2}$	$J^4_{7,3}$	$J^4_{7,4}$	$J^4_{7,5}$	$J^4_{7,6}$	$J^4_{7,7}$	$J^4_{7,8}$	0	$J^4_{7,10}$	$J^4_{7,11}$	$J^4_{7,12}$	$J^4_{7,13}$	$J^4_{7,14}$	$J^4_{7,15}$	$J^4_{7,16}$	$J^4_{7,17}$	0	0
	$J^4_{8,0}$	$J^4_{8,1}$	$J^4_{8,2}$	$J^4_{8,3}$	$J^4_{8,4}$	$J^4_{8,5}$	$J^4_{8,6}$	$J^4_{8,7}$	$J^4_{8,8} + J^a$	$J^e$	$J^4_{8,10}$	$J^4_{8,11}$	$J^4_{8,12}$	$J^4_{8,13}$	$J^4_{8,14}$	$J^4_{8,15}$	$J^4_{8,16}$	$J^4_{8,17}$	$J^i$	$J^m$
	$J^4_{9,0}$	$J^4_{9,1}$	$J^4_{9,2}$	$J^4_{9,3}$	$J^4_{9,4}$	$J^4_{9,5}$	$J^4_{9,6}$	$J^4_{9,7}$	$J^4_{9,8} + J^b$	$J^f$	$J^4_{9,10}$	$J^4_{9,11}$	$J^4_{9,12}$	$J^4_{9,13}$	$J^4_{9,14}$	$J^4_{9,15}$	$J^4_{9,16}$	$J^4_{9,17}$	$J^j$	$J^n$
	$J^4_{10,0}$	$J^4_{10,1}$	$J^4_{10,2}$	$J^4_{10,3}$	$J^4_{10,4}$	$J^4_{10,5}$	$J^4_{10,6}$	$J^4_{10,7}$	$J^4_{10,8}$	0	$J^4_{10,10}$	$J^4_{10,11}$	$J^4_{10,12}$	$J^4_{10,13}$	$J^4_{10,14}$	$J^4_{10,15}$	$J^4_{10,16}$	$J^4_{10,17}$	0	0
	$J^4_{11,0}$	$J^4_{11,1}$	$J^4_{11,2}$	$J^4_{11,3}$	$J^4_{11,4}$	$J^4_{11,5}$	$J^4_{11,6}$	$J^4_{11,7}$	$J^4_{11,8}$	0	$J^4_{11,10}$	$J^4_{11,11}$	$J^4_{11,12}$	$J^4_{11,13}$	$J^4_{11,14}$	$J^4_{11,15}$	$J^4_{11,16}$	$J^4_{11,17}$	0	0
	$J^4_{12,0}$	$J^4_{12,1}$	$J^4_{12,2}$	$J^4_{12,3}$	$J^4_{12,4}$	$J^4_{12,5}$	$J^4_{12,6}$	$J^4_{12,7}$	$J^4_{12,8}$	0	$J^4_{12,10}$	$J^4_{12,11}$	$J^4_{12,12}$	$J^4_{12,13}$	$J^4_{12,14}$	$J^4_{12,15}$	$J^4_{12,16}$	$J^4_{12,17}$	0	0
	$J^4_{13,0}$	$J^4_{13,1}$	$J^4_{13,2}$	$J^4_{13,3}$	$J^4_{13,4}$	$J^4_{13,5}$	$J^4_{13,6}$	$J^4_{13,7}$	$J^4_{13,8}$	0	$J^4_{13,10}$	$J^4_{13,11}$	$J^4_{13,12}$	$J^4_{13,13}$	$J^4_{13,14}$	$J^4_{13,15}$	$J^4_{13,16}$	$J^4_{13,17}$	0	0
	$J^4_{14,0}$	$J^4_{14,1}$	$J^4_{14,2}$	$J^4_{14,3}$	$J^4_{14,4}$	$J^4_{14,5}$	$J^4_{14,6}$	$J^4_{14,7}$	$J^4_{14,8}$	0	$J^4_{14,10}$	$J^4_{14,11}$	$J^4_{14,12}$	$J^4_{14,13}$	$J^4_{14,14}$	$J^4_{14,15}$	$J^4_{14,16}$	$J^4_{14,17}$	0	0
	$J^4_{15,0}$	$J^4_{15,1}$	$J^4_{15,2}$	$J^4_{15,3}$	$J^4_{15,4}$	$J^4_{15,5}$	$J^4_{15,6}$	$J^4_{15,7}$	$J^4_{15,8}$	0	$J^4_{15,10}$	$J^4_{15,11}$	$J^4_{15,12}$	$J^4_{15,13}$	$J^4_{15,14}$	$J^4_{15,15}$	$J^4_{15,16}$	$J^4_{15,17}$	0	0
	$J^4_{16,0}$	$J^4_{16,1}$	$J^4_{16,2}$	$J^4_{16,3}$	$J^4_{16,4}$	$J^4_{16,5}$	$J^4_{16,6}$	$J^4_{16,7}$	$J^4_{16,8}$	0	$J^4_{16,10}$	$J^4_{16,11}$	$J^4_{16,12}$	$J^4_{16,13}$	$J^4_{16,14}$	$J^4_{16,15}$	$J^4_{16,16}$	$J^4_{16,17}$	0	0
	$J^4_{17,0}$	$J^4_{17,1}$	$J^4_{17,2}$	$J^4_{17,3}$	$J^4_{17,4}$	$J^4_{17,5}$	$J^4_{17,6}$	$J^4_{17,7}$	$J^4_{17,8}$	0	$J^4_{17,10}$	$J^4_{17,11}$	$J^4_{17,12}$	$J^4_{17,13}$	$J^4_{17,14}$	$J^4_{17,15}$	$J^4_{17,16}$	$J^4_{17,17}$	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	$J^c$	$J^g$	0	0	0	0	0	0	0	0	$J^k$	$J^o$
	0	0	0	0	0	0	0	0	$J^d$	$J^h$	0	0	0	0	0	0	0	0	$J^l$	$J^p$

Resultados de la nueva matriz jacobiana  $J_{\text{new}}$ :

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	16.6086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16.6086	1.63	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	17.9721	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17.9721	0.85	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	40.3718	3.3968	-11.3569	0	-10.7311	-1.6895	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	-3.3968	40.3718	0.9867	0	1.6895	-10.7311	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	-11.2758	-1.676	6.9197	0	0	0	-5.644	-1.94	0	0	0	0	10	0
9	0	0	0	0	0	0	1.676	-11.2758	-3.616	-30	0	0	1.94	-5.644	0	0	0	0	0	-10
10	0	0	0	0	0	0	-10.6262	-2.257	0	0	16.232	2.3427	0	0	0	0	-5.6058	-1.8858	0	0
11	0	0	0	0	0	0	2.257	-10.6262	0	0	-4.1427	15.632	0	0	0	0	1.8858	-5.6058	0	0
12	0	0	-16.6086	0	0	0	0	0	-5.9569	0	0	0	36.7034	2.9042	-14.1379	-0.9085	0	0	0	0
13	0	0	1.63	0	0	0	0	0	0.3657	0	0	0	-2.9042	36.7034	0.9085	-14.1379	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13.9608	-2.4087	24.0914	1.8243	-10.1306	-1.4157	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.4087	-13.9608	-3.8243	23.3914	1.4157	-10.1306	0	0
16	0	0	0	0	-17.9721	0	0	0	0	0	-5.8672	-0.7463	0	0	-10.1818	-0.9823	34.0211	2.5786	0	0
17	0	0	0	0	0.85	0	0	0	0	0	0.7463	-5.8672	0	0	0.9823	-10.1818	-2.5786	34.0211	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-10	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-30

Sustituir los valores de inicialización en la barra k y en la barra del controlador:

$V_{50s} = V_{k0}$   
 $V_{100s} = V_{vr0}$

$\theta_{50s} = \theta_{k0}$   
 $\theta_{100s} = \theta_{vr0}$

Cálculo de  $P_i$  calculado y  $Q_i$  calculado en la barra k:

$$\begin{pmatrix} P_{50calss} \\ Q_{50calss} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} V_{50s} \cdot V_{100s} \cdot B_{vr} \cdot \sin(\theta_{50s} - \theta_{100s}) \\ -V_{50s} \cdot V_{50s} \cdot B_{vr} + V_{100s} \cdot V_{50s} \cdot B_{vr} \cdot \cos(\theta_{50s} - \theta_{100s}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Cálculo del vector de apartamiento:

$$FS := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ P2_{sp} - P20_{cal} \\ 0 \\ P3_{sp} - P30_{cal} \\ 0 \\ P4_{sp} - P40_{cal} \\ Q4_{sp} - Q40_{cal} \\ P5_{sp} - P50_{cal} + P50_{calss} \\ Q5_{sp} - Q50_{cal} + Q50_{calss} \\ P6_{sp} - P60_{cal} \\ Q6_{sp} - Q60_{cal} \\ P7_{sp} - P70_{cal} \\ Q7_{sp} - Q70_{cal} \\ P8_{sp} - P80_{cal} \\ Q8_{sp} - Q80_{cal} \\ P9_{sp} - P90_{cal} \\ Q9_{sp} - Q90_{cal} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline 2 & 1.63 \\ \hline 3 & 0 \\ \hline 4 & 0.85 \\ \hline 5 & 0 \\ \hline 6 & 0 \\ \hline 7 & 0.8614 \\ \hline 8 & -1.25 \\ \hline 9 & -0.609 \\ \hline 10 & -0.9 \\ \hline 11 & -0.042 \\ \hline 12 & 0 \\ \hline 13 & 0.6275 \\ \hline 14 & -1 \\ \hline 15 & -0.171 \\ \hline 16 & 0 \\ \hline 17 & 0.7101 \\ \hline 18 & 0 \\ \hline 19 & 0 \\ \hline \end{array}$$

Cálculo de  $\Delta V_i$  y  $\Delta \theta_i$ :

$\Delta \theta_{10s}$		0
$\Delta V_{10s}$	0	0
$\Delta \theta_{20s}$	1	0
$\Delta V_{20s}$	2	-0.1575
$\Delta \theta_{30s}$	3	0
$\Delta V_{30s}$	4	-0.0758
$\Delta \theta_{40s}$	5	0
$\Delta V_{40s}$	6	0.0408
$\Delta \theta_{50s}$	7	-0.0248
$\Delta V_{50s}$	8	0.076
$\Delta \theta_{60s}$	9	-0.0206
$\Delta V_{60s}$	10	0.0666
$\Delta \theta_{70s}$	11	$-8.3092 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{70s}$	12	-0.0613
$\Delta \theta_{80s}$	13	-0.0189
$\Delta V_{80s}$	14	$-9.2927 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{90s}$	15	$-8.8492 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{90s}$	16	-0.0298
$\Delta \theta_{100s}$	17	-0.0265
$\Delta V_{100s}$	18	0.076
	19	$6.8579 \cdot 10^{-3}$

$\therefore JS^{-1} \cdot -FS =$

No cumple el criterio de tolerancia.



Ingresar los valores de inicialización de voltaje y ángulo del controlador.

V100:= 1.00

θ100:= 0.00

Actualizar las variables  $V_i$  y  $\theta_i$ .

$$\begin{pmatrix} \theta_{11s} \\ V_{11s} \\ \theta_{21s} \\ V_{21s} \\ \theta_{31s} \\ V_{31s} \\ \theta_{41s} \\ V_{41s} \\ \theta_{51s} \\ V_{51s} \\ \theta_{61s} \\ V_{61s} \\ \theta_{71s} \\ V_{71s} \\ \theta_{81s} \\ V_{81s} \\ \theta_{91s} \\ V_{91s} \\ \theta_{101s} \\ V_{101s} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 1.04 \\ \theta_{20} \\ V_{20} \\ \theta_{30} \\ V_{30} \\ \theta_{40} \\ V_{40} \\ \theta_{50} \\ 1 \\ \theta_{60} \\ V_{60} \\ \theta_{70} \\ V_{70} \\ \theta_{80} \\ V_{80} \\ \theta_{90} \\ V_{90} \\ \theta_{100} \\ V_{100} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\Delta\theta_{20s} \\ -\Delta V_{20s} \cdot V_{20} \\ -\Delta\theta_{30s} \\ -\Delta V_{30s} \cdot V_{30} \\ -\Delta\theta_{40s} \\ -\Delta V_{40s} \cdot V_{40} \\ -\Delta\theta_{50s} \\ 0 \\ -\Delta\theta_{60s} \\ -\Delta V_{60s} \cdot V_{60} \\ -\Delta\theta_{70s} \\ -\Delta V_{70s} \cdot V_{70} \\ -\Delta\theta_{80s} \\ -\Delta V_{80s} \cdot V_{80} \\ -\Delta\theta_{90s} \\ -\Delta V_{90s} \cdot V_{90} \\ -\Delta\theta_{100s} \\ -\Delta V_{50s} \cdot V_{100} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.04 \\ 0.1575 \\ 1.025 \\ 0.0758 \\ 1.025 \\ -0.0408 \\ 1.0248 \\ -0.076 \\ 1 \\ -0.0666 \\ 1.0083 \\ 0.0613 \\ 1.0189 \\ 9.2927 \cdot 10^{-3} \\ 1.0088 \\ 0.0298 \\ 1.0265 \\ -0.076 \\ 1.0206 \end{pmatrix}$$

Como no cumple con la estimación de error se procede a iterar.

Primera iteración:

Cálculo de  $P_i$  calculado y  $Q_i$  calculado:

$$\begin{pmatrix} P_{51calss} \\ Q_{51calss} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} V_{51s} \cdot V_{101s} \cdot B_{vr} \cdot \sin(\theta_{51s} - \theta_{101s}) \\ -V_{51s} \cdot V_{51s} \cdot B_{vr} + V_{101s} \cdot V_{51s} \cdot B_{vr} \cdot \cos(\theta_{51s} - \theta_{101s}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.2057 \end{pmatrix}$$

Resultados de  $P_i$  calculado y  $Q_i$  calculado:

P11cals	P1cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)		0
Q11cals	Q1cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	0	0.7549
P21cals	P2cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	1	0.2907
Q21cals	Q2cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	2	1.6065
P31cals	P3cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	3	0.1777
Q31cals	Q3cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	4	0.8264
P41cals	P4cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	5	$-7.3731 \cdot 10^{-3}$
Q41cals	Q4cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	6	0.0122
P51cals	P5cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	7	-0.0496
Q51cals	Q5cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	8	-1.2958
P61cals	P6cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	9	-0.3616
Q61cals	Q6cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	10	-0.8848
P71cals	P7cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	11	-0.3294
Q71cals	Q7cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	12	0.011
P81cals	P8cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	13	-0.1791
Q81cals	Q8cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	14	-0.9735
P91cals	P9cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	15	-0.3632
Q91cals	Q9cal(V11s, 011s, V21s, 021s, V31s, 031s, V41s, 041s, V51s, 051s, V61s, 061s, V71s, 071s, V81s, 081s, V91s, 091s)	16	-0.011
		17	-0.0947

Cálculo del vector de apartamiento:

$$FS1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ P2sp - P2lcals \\ 0 \\ P3sp - P3lcals \\ 0 \\ P4sp - P4lcals \\ Q4sp - Q4lcals \\ P5sp - P5lcals + P5lcals \\ Q5sp - Q5lcals + Q5lcals \\ P6sp - P6lcals \\ Q6sp - Q6lcals \\ P7sp - P7lcals \\ Q7sp - Q7lcals \\ P8sp - P8lcals \\ Q8sp - Q8lcals \\ P9sp - P9lcals \\ Q9sp - Q9lcals \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline 2 & 0.0235 \\ \hline 3 & 0 \\ \hline 4 & 0.0236 \\ \hline 5 & 0 \\ \hline 6 & -0.0122 \\ \hline 7 & 0.0496 \\ \hline 8 & 0.0458 \\ \hline 9 & -0.2827 \\ \hline 10 & -0.0152 \\ \hline 11 & 0.0294 \\ \hline 12 & -0.011 \\ \hline 13 & 0.1791 \\ \hline 14 & -0.0265 \\ \hline 15 & 0.0132 \\ \hline 16 & 0.011 \\ \hline 17 & 0.0947 \\ \hline 18 & 0 \\ \hline 19 & 0 \\ \hline \end{array}$$

Cálculo de  $\Delta V_i$  y  $\Delta \theta_i$ :

$\Delta \theta_{11s}$		0
$\Delta V_{11s}$	0	0
$\Delta \theta_{21s}$	1	0
$\Delta V_{21s}$	2	$-4.2672 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{31s}$	3	0
$\Delta V_{31s}$	4	$-5.7074 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{41s}$	5	0
$\Delta V_{41s}$	6	$-2.1809 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{51s}$	7	$-2.6536 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{51s}$	8	$-6.5277 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{61s}$	9	$-7.3334 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{61s}$	10	$-2.3806 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{71s}$	11	$-5.647 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{71s}$	12	$-3.6197 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{81s}$	13	$-7.8414 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{81s}$	14	$-3.5202 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{91s}$	15	$-7.8299 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{91s}$	16	$-4.6853 \cdot 10^{-3}$
$\Delta \theta_{101s}$	17	$-6.1594 \cdot 10^{-3}$
$\Delta V_{101s}$	18	$-6.5277 \cdot 10^{-3}$
	19	$2.4445 \cdot 10^{-3}$

$:= JS^{-1} \cdot -FS1 =$

No cumple con el criterio de estimación de error.

La estimación de error se establece a la 56ava iteración.

Cálculo de  $P_i$  calculado y  $Q_i$  calculado:

$$\begin{pmatrix} P_{556\text{calss}} \\ Q_{556\text{calss}} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} V_{556s} \cdot V_{1056s} \cdot B_{vr} \cdot \sin(\theta_{556s} - \theta_{1056s}) \\ -V_{556s} \cdot V_{556s} \cdot B_{vr} + V_{1056s} \cdot V_{556s} \cdot B_{vr} \cdot \cos(\theta_{556s} - \theta_{1056s}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.3984 \end{pmatrix}$$

Resultados de  $P_i$  calculado y  $Q_i$  calculado:

( P156cals	( P1cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)	=		0
Q156cals	Q1cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		0	0.7161
P256cals	P2cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		1	0.2408
Q256cals	Q2cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		2	1.63
P356cals	P3cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		3	0.0486
Q356cals	Q3cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		4	0.85
P456cals	P4cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		5	-0.1173
Q456cals	Q4cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		6	0
P556cals	P5cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		7	-1.8251·10 <sup>-15</sup>
Q556cals	Q5cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		8	-1.25
P656cals	P6cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		9	-0.4516
Q656cals	Q6cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		10	-0.9
P756cals	P7cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		11	-0.3
Q756cals	Q7cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		12	0
P856cals	P8cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		13	0
Q856cals	Q8cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		14	-1
P956cals	P9cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		15	-0.35
Q956cals)	Q9cal(V156s,0156s,V256s,0256s,V356s,0356s,V456s,0456s,V556s,0556s,V656s,0656s,V756s,0756s,V856s,0856s,V956s,0956s)		16	0
			17	0

Cálculo del vector de apartamiento:

FS56 :=

0

0

P2sp – P256cals

0

P3sp – P356cals

0

P4sp – P456cals

Q4sp – Q456cals

P5sp – P556cals + P556cals

Q5sp – Q556cals + Q556calss

P6sp – P656cals

Q6sp – Q656cals

P7sp – P756cals

Q7sp – Q756cals

P8sp – P856cals

Q8sp – Q856cals

P9sp – P956cals

Q9sp – Q956cals

0

0

=

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	1.8251·10 <sup>-15</sup>
8	0
9	-3.0942·10 <sup>-13</sup>
10	0
11	-1.4988·10 <sup>-15</sup>
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0

50



Cálculo de  $\Delta V_i$  y  $\Delta \theta_i$ :

$\Delta \theta_{156s}$		0
$\Delta V_{156s}$	0	0
$\Delta \theta_{256s}$	1	0
$\Delta V_{256s}$	2	0
$\Delta \theta_{356s}$	3	0
$\Delta V_{356s}$	4	0
$\Delta \theta_{456s}$	5	0
$\Delta V_{456s}$	6	0
$\Delta \theta_{556s}$	7	0
$\Delta V_{556s}$	8	0
$\Delta \theta_{656s}$	9	$-1.1591 \cdot 10^{-14}$
$\Delta V_{656s}$	10	0
$\Delta \theta_{756s}$	11	0
$\Delta V_{756s}$	12	0
$\Delta \theta_{856s}$	13	0
$\Delta V_{856s}$	14	0
$\Delta \theta_{956s}$	15	0
$\Delta V_{956s}$	16	0
$\Delta \theta_{1056s}$	17	0
$\Delta V_{1056s}$	18	0
	19	$3.8636 \cdot 10^{-15}$

$:= JS^{-1} \cdot -FS56 =$

Resultados de voltajes y ángulos en las barras y el STATCOM. El voltaje y ángulo del compensador son V1056s y  $\theta_{1056s}$ .

$\begin{pmatrix} \theta_{157s} \\ V_{157s} \\ \theta_{257s} \\ V_{257s} \\ \theta_{357s} \\ V_{357s} \\ \theta_{457s} \\ V_{457s} \\ \theta_{557s} \\ V_{557s} \\ \theta_{657s} \\ V_{657s} \\ \theta_{757s} \\ V_{757s} \\ \theta_{857s} \\ V_{857s} \\ \theta_{957s} \\ V_{957s} \\ \theta_{1057s} \\ V_{1057s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1.04 \\ \theta_{256s} \\ V_{256s} \\ \theta_{356s} \\ V_{356s} \\ \theta_{456s} \\ V_{456s} \\ \theta_{556s} \\ 1 \\ \theta_{656s} \\ V_{656s} \\ \theta_{756s} \\ V_{756s} \\ \theta_{856s} \\ V_{856s} \\ \theta_{956s} \\ V_{956s} \\ \theta_{1056s} \\ V_{1056s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\Delta\theta_{256s} \\ -\Delta V_{256s} \cdot V_{256s} \\ -\Delta\theta_{356s} \\ -\Delta V_{356s} \cdot V_{356s} \\ -\Delta\theta_{456s} \\ -\Delta V_{456s} \cdot V_{456s} \\ -\Delta\theta_{556s} \\ 0 \\ -\Delta\theta_{656s} \\ -\Delta V_{656s} \cdot V_{656s} \\ -\Delta\theta_{756s} \\ -\Delta V_{756s} \cdot V_{756s} \\ -\Delta\theta_{856s} \\ -\Delta V_{856s} \cdot V_{856s} \\ -\Delta\theta_{956s} \\ -\Delta V_{956s} \cdot V_{956s} \\ -\Delta\theta_{1056s} \\ -\Delta V_{556s} \cdot V_{1056s} \end{pmatrix}$	$\begin{matrix} \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 1.04 \\ 0.1618 \\ 1.025 \\ 0.0815 \\ 1.025 \\ -0.0386 \\ 1.0274 \\ -0.0696 \\ 1 \\ -0.0642 \\ 1.014 \\ 0.0649 \\ 1.0269 \\ 0.0128 \\ 1.0167 \\ 0.0345 \\ 1.0328 \\ -0.0696 \\ 1.0398 \end{matrix}$
--	---	---	---	--

Conversión de radianes a grados en los ángulos:

$\theta_{157s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V157s	
$\theta_{257s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V257s	
$\theta_{357s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V357s	
$\theta_{457s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V457s	
$\theta_{557s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V557s	
$\theta_{657s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V657s	
$\theta_{757s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V757s	
$\theta_{857s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V857s	
$\theta_{957s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V957s	
$\theta_{1057s} \cdot \frac{180}{\pi}$	
V1057s	

	0
0	0
1	1.04
2	9.272
3	1.025
4	4.6722
5	1.025
6	-2.2121
7	1.0274
8	-3.9886
9	1
10	-3.6762
11	1.014
12	3.7176
13	1.0269
14	0.7339
15	1.0167
16	1.9754
17	1.0328
18	-3.9886
19	1.0398

Trasferencia de potencia activa y reactiva, tanto en el bus k como en el bus del controlador:

$$P_{bus57} := \frac{V_{1057s} \cdot V_{557s}}{X_{vr}} \cdot \sin(\theta_{1057s} - \theta_{1057s}) = 0$$

$$P_{st57} := \frac{V_{557s} \cdot V_{1057s}}{X_{vr}} \cdot \sin(\theta_{557s} - \theta_{1057s}) = 0$$

$$Q_{bus57} := - \left( \frac{V_{557s} \cdot V_{1057s}}{X_{vr}} \cdot \cos(\theta_{1057s} - \theta_{557s}) - \frac{V_{557s}^2}{X_{vr}} \right) = 0.3984i$$

$$Q_{st57} := - \left( \frac{V_{1057s} \cdot V_{557s}}{X_{vr}} \cdot \cos(\theta_{1057s} - \theta_{557s}) - \frac{V_{1057s}^2}{X_{vr}} \right) = -0.4143i$$